



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE**

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**OPTIMALIZACE VÝROBY HLINÍKOVÉHO ODLITKU S  
POUŽITÍM NUMERICKÉ SIMULACE**

OPTIMIZATION OF ALUMINIUM CASTING PROCESS USING NUMERICAL SIMULATION

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Martin Kolařík**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. Vladimír Krutiš, Ph.D.**

**BRNO 2019**

# Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie  
Student: **Bc. Martin Kolařík**  
Studijní program: Strojní inženýrství  
Studijní obor: Slévárenská technologie  
Vedoucí práce: **Ing. Vladimír Krutiš, Ph.D.**  
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

## Optimalizace výroby hliníkového odlitku s použitím numerické simulace

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Stále narůstající tlak na kvalitu a nižší cenu odlitků vede výrobní závody k optimalizaci jednotlivých výrobních postupů, a to i odlitků, které jsou již zavedeny do sériové výroby. Gravitační lití hliníku do pískových forem se v řadě případů raději drží vysoké provozní jistoty a léta zavedených postupů s nízkým využitím kovu, než-li promyšlené optimalizaci, která vyžaduje změnu určitých technologických návyků. Numerická simulace je nástrojem, který může překonat tyto bariéry provozní „opatrnosti“ a může technologům pomoci jít až na hranici daného procesu.

### Cíle diplomové práce:

Cílem práce je posouzení vybraného odlitku s ohledem na použitou výrobní technologii a se zaměřením na analýzu vtokové a nálitkové soustavy včetně hodnocení využití kovu a zmapování výskytu slévárenských vad. Následně pomocí numerické simulace, případně dalších metod, navrhnout takové technologické zásahy, které by minimalizovaly rozsah vad a maximalizovaly využití kovu a tím vedly k výrobním úsporám.

### Seznam doporučené literatury:

BOLONO, F., S. ODORIZZI. Numerical simulation of Foundry Processes, Program Leonardo da Vinci, 2001.

CAMPBELL, J. Castings. 2nd ed. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2003. ISBN 97-807-50-4-7908.

ČECH, J. Vady a kontrola odlitků. 2., přeprac. vyd. Brno: VUT, 1991. ISBN 80-214-0278-4.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **Abstrakt**

Diplomová práce se zabývá rozбором technologie lití vybraného odlitku ze slitiny hliníku. Jedná se o odlitek frézovací hlavy do CNC stroje, odlévaný technologií gravitačního lití do kovové formy. Byla provedena analýza vad, které jsou příčinou vysokého procenta neshodné výroby. Dále je součástí práce kompletní analýza plnění a tuhnutí tohoto odlitku v simulačním programu ProCast. Je provedeno ověření výsledků numerické simulace a její doladění. Poté jsou na několika vypočtených variantách dokázány příčiny problematických vad. Jsou navržena opatření, které minimalizují sklony ke vzniku vad vedoucích k neshodné výrobě.

## **Klíčová slova**

Numerická simulace, ProCast, Slitiny hliníku, Kokilové gravitační lití, slitina AlSi12,

## **Abstract**

The master's thesis deals with the analysis of casting technology of the selected aluminium casting. It is a casting of a part of CNC milling machine and it is cast by gravity casting into a permanent mold. The defects which are the cause of a high percentage of nonconforming production were analyzed. Furthermore, the master's thesis includes a complete analysis of filling and solidification of this casting in the ProCast simulation program. Numerical simulation results are verified and improved. Then the causes of problematic casting defects are proven on several calculated variants. Measures are proposed to minimize the tendency to produce castings with defects leading to nonconforming production.

## **Keywords**

Numerical simulation, ProCast, Aluminium alloys, Permanent mold casting, AlSi12 alloy

## **Bibliografická citace**

KOLAŘÍK, Martin. *Optimalizace výroby hliníkového odlitku s použitím numerické simulace* [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/117429>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Vladimír Krutiš.

## **Prohlášení**

Tímto prohlašuji, že předkládanou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího diplomové práce.

V Brně dne .....

.....

Martin Kolařík

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval panu Ing. Vladimírovi Krutišovi, Ph.D. za veškerou pomoc, ochotu, vstřícnost a poskytnutí cenných rad při vypracování této diplomové práce. Také bych rád poděkoval Ing. Zbyňkovi Kuzmovi z firmy Mecas ESI s.r.o za cenné rady a pomoc při zpracování numerických simulací. Dále bych rád poděkoval kolektivu technologického úseku Slévárny a modelárny Nové Ransko s.r.o za poskytnuté informace a konzultace ohledně odlitku řešeného v této diplomové práci. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat svým rodičům za podporu během studia.

# Obsah

Úvod.....	10
1 Numerické simulace ve slévárenství.....	11
1.1 Numerické metody .....	12
1.1.1 Metoda konečných diferencí (FDM).....	13
1.1.2 Metoda konečných prvků (FEM) .....	13
1.2 Simulační software .....	14
1.2.1 Dnešní možnosti simulačních programů .....	14
1.2.2 Moduly programového prostředí ProCast .....	15
2 Gravitační lití slitin hliníku do kovových forem.....	17
2.1 Tepelné děje při tuhnutí odlitků v kovových formách .....	19
2.1.1 Tepelné děje v tuhnoucí tavenině.....	20
2.1.2 Tepelné děje na rozhraní odlitku a formy .....	21
2.1.3 Tepelné děje v kokilách.....	23
2.1.4 Metody řešení tuhnutí odlitků .....	23
2.2 Tepelný cyklus formy .....	24
3 Rozbor vybraného odlitku.....	26
3.1 Typ slitiny.....	27
3.2 Současný stav .....	28
3.2.1 Technologie výroby.....	29
3.2.2 Analýza vyskytujících se slévárenských vad .....	31
3.3 Geometrie .....	37
4 Numerická simulace vybraného odlitku .....	39
4.1 Preprocessing .....	39
4.2 Cyklování kokily .....	41
4.3 Analýza plnění.....	45
4.3.1 Rozložení teplot.....	45
4.3.2 Rychlost proudění tekutého kovu.....	47
4.3.3 Vzduch při plnění .....	50
4.3.4 Vznik oxidů ve slitinách hliníku .....	51
4.3.5 Další možnosti v analýze plnění.....	52
4.4 Analýza tuhnutí.....	54
4.4.1 Doba tuhnutí.....	54

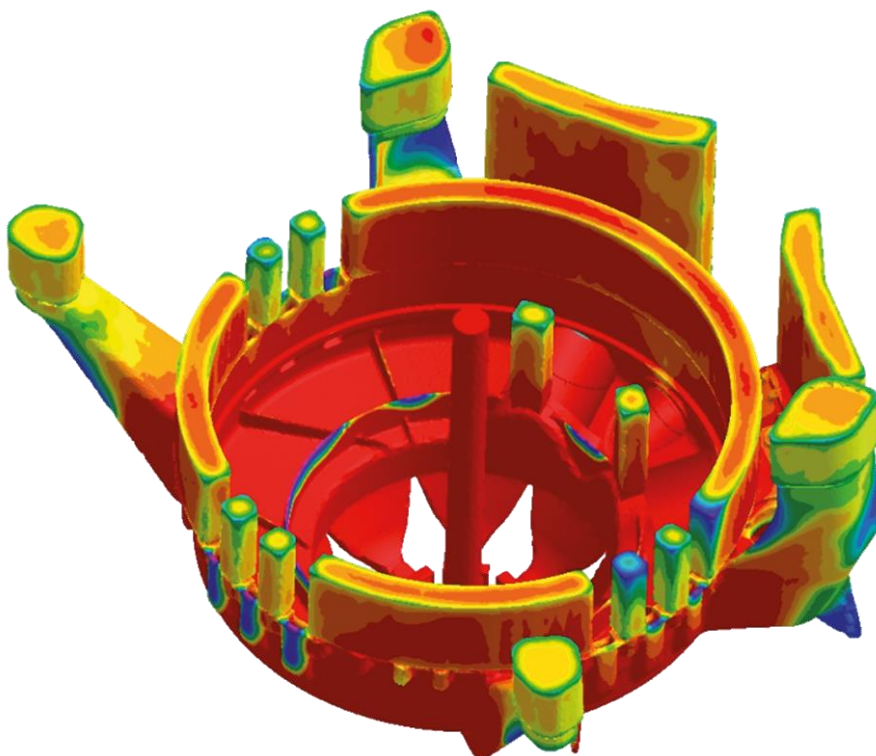


4.4.2	Frakce solidu .....	55
4.4.3	Predikce porezity .....	55
4.4.4	Další možnosti v analýze tuhnutí .....	56
5	Rozbor vad odlitku numerickou simulací .....	58
5.1	Upřesnění numerické simulace .....	58
5.2	Simulace vady v oblasti 1 .....	61
5.2.1	Vliv prvního cyklu (Varianta 1A) .....	61
5.2.2	Vliv přehřátí v oblasti pod středovým jádrem (Varianta 1B) .....	62
5.2.3	Vliv chladného středového jádra (Varianta 1C) .....	63
5.2.4	Vliv chlazení středového jádra na cyklování (Varianta 1D) .....	66
5.3	Simulace vady v oblasti 2 .....	69
5.3.1	Vliv snížení intenzity přestupu tepla (Varianta 2A) .....	69
5.3.2	Vliv účinnosti izolace bočních nálitků (Varianta 2B) .....	71
5.3.3	Vliv zaslepení bočních nálitků (Varianta 2C) .....	73
5.4	Simulace kombinace příčin .....	76
5.4.1	Vliv chladného jádra v kombinaci s izolovanými bočními nálitky (Var. 3A) ...	76
5.4.2	Vliv chlazeného jádra bez bočních nálitků (Varianta 3B) .....	77
5.5	Doporučená podoba technologické karty .....	80
	Závěr .....	81
	Seznam použitých zdrojů a literatury .....	83
	Seznam obrázků .....	85
	Seznam tabulek .....	87

## Úvod

V posledních dvou desetiletích je zaznamenáván výrazný nárůst ve využívání odlitků z hliníkových slitin. Tento nárůst je daný především automobilovým průmyslem, kde je v souvislosti s požadavky na co nejnižší emise snahou minimalizovat hmotnost jednotlivých dílů. Slévárenská technologie je velmi často vhodnou technologií pro sériovou výrobu automobilových dílů složitých tvarů. Nejrozšířenější technologií v oblasti hliníkových slitin je, zejména pro svou vysokou produktivitu výroby, tlakové lití. Vedle této technologie je pro výrobu zejména těžších odlitků z hliníkových slitin využíváno klasické gravitační lití do pískové formy nebo kokily.

Podobně, jako v ostatních oblastech strojírenství, je i ve slévárenství snaha zavádět inovace vedoucí ke zdokonalení procesu výroby. Nedílnou součástí pokroku ve slévárenském průmyslu je v posledních letech zavádění numerických simulací. Její rozvoj jde společně s pokrokem v oblasti počítačové techniky. První slévárenské simulační programy byly na světový trh uvedeny v devadesátých letech. V té době byly vnímány jako vysoce nákladné nástroje s nejistou návratností investice. V dnešní době je převažující názor podstatně jiný a simulační software je běžně využíván ve slévárnách k úspoře nákladů a času. Dnes je možné simulovat celou výrobu odlitku od plnění slévárenské formy, přes tuhnutí a chladnutí, tepelné zpracování až po výsledné mechanické vlastnosti odlitku [1].

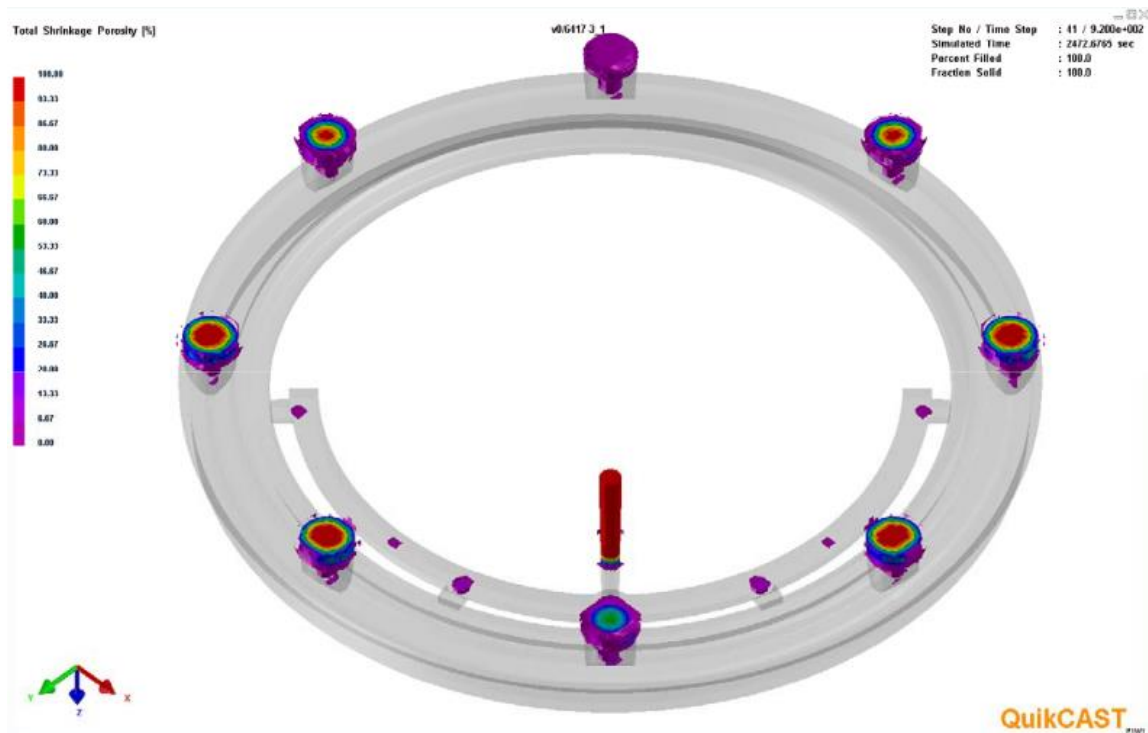


Obr. 1 Numerická simulace tuhnutí hliníkového odlitku [2]

# 1 Numerické simulace ve slévárenství

Simulace výroby odlitků na základě matematických modelů a numerických simulací je dnes uznávanou technologií. Numerická simulace by měla především sloužit k testování různých návrhů technologie lití. Tím se eliminuje klasická metoda pokusů a omylů, což je přístup nákladný a zejména zdoluhavý. V současnosti, kdy se stále více tlačí na čas dodání odlitku, může jakákoli časová úspora při návrhu technologie znamenat významnou konkurenční výhodu. S tím spojená produktivita výroby bude do budoucna s rostoucí automatizací a optimalizací výrobních procesů hrát čím dál větší roli. Simulaci je tedy vhodné využívat při návrhu technologie a snížit tak riziko výroby neshodných odlitků hned na počátku procesu. Vedle minimalizování výskytu vad je tu ekonomické hledisko a s ním spojené využití tekutého kovu. Simulační software pomáhá při návrhu nálitků, vtoků, a v neposlední řadě v ideálním umístění chladítek. U takové optimalizace se nemusí jednat jen o přepočítání několika technologem navržených variant. Dnešní matematické modely jsou schopny předpokládat optimální řešení tvaru a umístění technologických prvků na základě vnitřního algoritmu, definice cílů a zadání mezních parametrů [3], [4].

Na obrázku č. 2 je uveden příklad, kdy se s využitím programu QuikCast podařilo navrhnout ideální technologii k rozměrném odlitku prstence z oceli. Klasickými metodami návrhu technologie bylo odhadované využití tekutého kovu 50 %. Při čisté hmotnosti odlitku 900 kg by v tomto případě byla překročena tavící kapacita slévárny. Využitím numerických simulací se technologie vyladila tak, že se využití kovu zvýšilo na 75 %. Tavící kapacita byla dostatečná a odlitek byl predikován bez slévárenských vad. Slévárna tedy mohla přijat zakázku, kterou by zřejmě na základě klasických metod návrhu technologie musela odmítnout [5].



Obr. 2 Optimalizace technologie ocelového prstence – predikce porezity [5]

Nicméně častější aplikací numerické simulace v praxi je stále analýza stávající technologie a určení možných příčin již vyskytujících se slévárenských vad. Důvodem je zřejmě problém, který nastával především v dřívějších letech, kdy nebyly k dispozici 3D data odlitků, potřebná pro numerickou simulaci. Teprve po neúspěšné snaze vyřešit vzniklé problémy pokusy v provozu se přistoupilo k využití simulace pro optimalizaci stávající technologie. V dnešní době jsou ovšem potřebná 3D data odlitků většinou k dispozici. Navíc existují další možnosti jak je získat, jako například využití 3D skenování a následné převedení do CAD formátů [3].

Počáteční náklady na simulační software mohou být vysoké, ale při vhodném využití je vysoká návratnost těchto nákladů. Především snížením procenta neshodných kusů, zrychlením procesu návrhu technologie výroby odlitku a zlepšením využití tekutého kovu. Další přínosy numerických simulací jsou ve vzdělávání. Dává nám lepší představu o tom, jakým způsobem se chová kov při plnění slévárenské formy, o formování tepelných uzlů, dosazovací vzdálenosti nálitků a podobně [3].

S nastupující digitalizací výroby a stále větším uplatněním počítačové podpory inženýrských prací (CAE – Computer Aided Engineering) lze předpokládat další rozšiřování možností využití tohoto nástroje. Příkladem je snaha zabudování simulací do dalších technických výpočtů, které budou využívat již provedené analýzy. V automobilovém průmyslu se jedná například o virtuální testovací prostředí, kdy je při simulovaných nárazových zkouškách využito rozložení zbytkového pnutí v odlitku [6].

## 1.1 Numerické metody

Při použití numerických metod pro technické výpočty, je potřeba znát nejen počáteční a okrajové podmínky, ale také materiálové charakteristiky všech komponent v řešené soustavě. Přesná znalost těchto termofyzikálních dat je klíčovým bodem k získání správných výsledků simulace. Mezi tyto data patří především tepelná vodivost, viskozita, entalpie a hustota. V případě výpočtů zbytkových napětí a deformací také moduly pružnosti, tepelné roztažnosti a další. Jednou z možností jak tyto data získat je, že jsou obsaženy přímo v materiálové databázi simulačního programu. Lze je také získat inverzním modelováním, což je kombinace numerických výpočtů a experimentů. Další možností jsou například finančně náročná přímá experimentální měření [6].

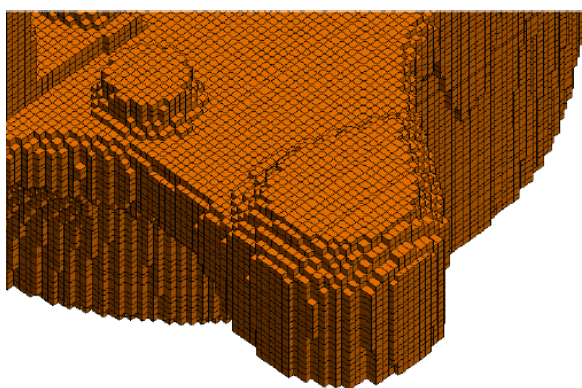
Pro výpočty tepelných dějů mezi odlitkem a slévárenskou formou se uplatnily numerické metody. Tyto výpočtové metody pracují na principu diskreditace proměnných. Je pro ně typická opakovatelnost jednoduchých algebraických operací. Výsledkem numerických výpočtů je řešení v konečném počtu diskrétních uzlů, a to v povrchové části nebo v celé oblasti. Jedná se tedy o přibližné řešení. Numerické metody se dělí právě podle toho, jakým způsobem byla vytvořena diferenční síť [6]. Jsou to [6]:

- metody konečných diferencí (Finite Difference Method – FDM),
- metody konečných prvků (Finite Element Method – FEM),
- metody konečných objemů (Finite Volume Method – FVM),
- metody hraničních prvků (Boundary Element Method – BEM).

Ve slévárenských simulačních programech se uplatnily první dvě z těchto metod tvorby sítě. Dnešní komerční software je schopen automaticky generovat vysoce kvalitní síť, ať už na základě metody konečných diferencí nebo metody konečných prvků.

### 1.1.1 Metoda konečných diferencí (FDM)

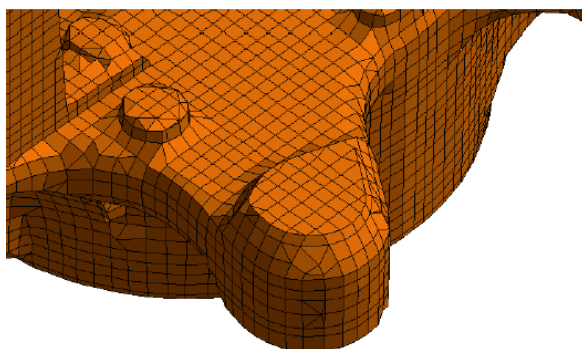
Jiný název pro tuto metodu je metoda sítí. Její podstatou je aproximace základní diferenciální rovnice s příslušnými okrajovými podmínkami, které odpovídají diferenční rovnici. Tato rovnice má tvar soustavy algebraických rovnic. K dnes nejpoužívanějším druhům sítí patří pravidelné pravoúhlé síť. Nepravidelné síť se používají při zhušťování v místech, kde je potřeba větší přesnost výpočtu. Na hustotě sítě závisí náročnost výpočtu. Na obrázku č. 3 je příklad sítě vygenerované metodou konečných diferencí [4], [6].



Obr. 3 Síť vygenerovaná metodou FDM [6]

### 1.1.2 Metoda konečných prvků (FEM)

Jedná se o variační metodu, která vznikla na základě Dirichletova principu řešení diferenciálních rovnic. Spojitá plocha je rozdělena na síť konečných prvků vhodného tvaru, které jsou spolu vázané v uzlech (v konečném počtu bodů). Na těchto elementárních oblastech je řešení diferenciální rovnice aproximováno lineárními nebo kvadratickými polynomy. Na obrázku č. 4 je příklad sítě vygenerované metodou konečných prvků [4], [6].



Obr. 4 Síť vygenerovaná metodou FEM [6]

Na častou otázku, která metoda je lepší, neexistuje jednoznačná odpověď. Metoda FDM deformuje při aproximaci oblé části modelu, což může ovlivňovat přesnost, pokud se neprovede lokální korekce. Tuto korekci zvládají některé simulační programy automaticky během výpočtu. Je také náchylná na přesnost ve větších hloubkách pod povrchem při řešení rozložení teplot. Má naopak menší nároky na hardware, protože umožňuje snadnější diskreditaci. Výhody metody FEM spočívají v lepším kopírování tvaru povrchu modelu a také umožňuje lokální zhuštění sítě v problémových místech. Touto metodou lze navíc řešit i deformace odlitku při vzájemném kontaktu s formou. Nevýhodou jsou větší nároky na hardware a delší časy výpočtů. Není ovšem vyloučena kombinace obou těchto metod. Například proudění a přenos tepla může být počítán metodou FDM a následné deformační a pevnostní charakteristiky metodou FEM [4], [6].

## 1.2 Simulační software

V dnešní době je dostupná celá řada simulačních programů, které nabízejí řešení slévárenských procesů. Vypovídací hodnota a míra shody výsledků získaných numerickou simulací s realitou závisí především na tom, jak software umí [7]:

- dobře matematicky popsat dílčí děje,
- zahrnout odchylky stavu a chování litého materiálu od ideálního předpokladu jednofázového stavu taveniny,
- numericky vyjádřit mechanické a fyzikální vlastnosti odlévaného materiálu v závislosti na teplotě.

### 1.2.1 Dnešní možnosti simulačních programů

V současné době je simulace slévárenských procesů zpracována pro všechny běžně používané technologie výroby gravitačního lití do pískové formy nebo kokily. Vedle toho jsou k dispozici moduly pro lití do kovových forem za zvýšených sil, metodu lost foam, lití na vytavitelný nebo spalitelný model, odstředivé lití, lití ve vakuu, lití monokrystalické struktury, lití v polotuhém stavu, kontinuální lití a také pro vstřelování a profukování jader. Simulační software na tyto specifické technologie nasazuje speciální výpočtové moduly s různým typem definic okrajových a počátečních podmínek. Dále budou shrnuty hlavní skupiny problémů, které jsou v dnešní době řešeny pomocí simulačních programů [3].

Problematika řešená při plnění pískové formy [4], [6]:

- doba plnění dutiny formy, správné fungování zářezů,
- sklon k nasávání vzduchu během vstupu tekutého kovu do formy,
- sledování rozdělení teploty v tavenině, identifikace míst s potencionálně nepřiměřeným ochlazováním a tuhnutím,
- charakter plnění formy – rychlost proudění kovů v různých částech systému (Reynoldsovo kritérium), vznik vírů a turbulencí,
- eroze pískové formy nebo jader.

#### Problematika řešená při plnění kovové formy (gravitační, nebo tlakové lití) [6]:

- teplotní pole – rozložení v jednotlivých časech výrobního cyklu, teplotní zátěž formy a jader, teplotní režim při náběhu výroby, atd.,
- plynulost a čas plnění přetoků, ověřování jestli dostatečně zachycují plyny a vměstky,
- návrh tlaků pro jednotlivé části procesu,
- optimalizování technologických časů procesu,
- vliv nátěrů a postřiků,
- ověření správného fungování chladících kanálů.

#### Problematika řešená při tuhnutí, chladnutí a výsledné materiálové vlastnosti [6]:

- teplotní gradienty, doby tuhnutí a rozložení teplot při tuhnutí,
- lokalizace míst, kde zůstává při tuhnutí oddělen tekutý kov již ztuhlým kovem,
- nukleace a růst zrn a vzdálenost sekundárních os dendritů,
- vnitřní jakost odlitku – mikrostaženiny, tvorba plynových bublin,
- napětí ve specifických částech odlitku a jeho deformace,
- rozložení napětí ve formě a deformace formy,
- modelování struktury materiálu, výpočet mechanických vlastností materiálu, výpočet tvrdosti.

Kromě optimalizace využití tekutého kovu je hlavním úkolem simulací minimalizovat výskyt slévárenských vad. Ve fázi plnění lze řešit zejména nezaběhnutí, studené spoje, uzavřený vzduch v dutině odlitku, vznik oxidů a míru oxidace volné hladiny během plnění, povrchové vady, vměstky a odvařeniny od jádra. Ve fázi tuhnutí potom predikci staženin, ředin, tepelných uzlů, plynové pórovitosti, mikropórovitosti, připečenin a penetrace kovu do slévárenské formy. Pokročilé moduly se zabývají predikcí vzniku trhlin, prasklin, zbytkových pnutí, deformací a únavovou životností. V oblasti metalurgie je možné se zabývat segregací prvků. Je možné také predikovat výslednou rozměrovou přesnost odlitků [8].

### **1.2.2 Moduly programového prostředí ProCast**

V experimentální části této práce byl k simulacím vybraného odlitku použit simulační software ProCast od společnosti ESI Group. ProCast umožňuje kompletní řešení problematiky slévárenské technologie. Tento softwarový systém je tvořen několika dílčími moduly. Pro účely praktické části byly využity tyto dva základní výpočtové moduly [7], [8]:

- Fluid Flow Module (modul proudění) – Je určen pro analýzu plnění dutiny běžných forem, ale i skořepin. Obsahuje řešení Navier Stokesovy rovnice. Lze simulovat laminární proudění, turbulentní proudění, proudění newtonovských i nenewtonovských kapalin (tixocasting, vosky,...). Je zde zohledněn i vliv zpětného tlaku při vysokotlakém lití. Umožňuje výpočet proudění pro technologii vytavitelného vosku a spalitelného modelu.

- Thermal Module (základní modul tuhnutí a predikce vad) – Slouží pro analýzu teplotních polí ve fázi tuhnutí a chladnutí. Umožňuje predikci porezity, mikroporezity, staženin (Niyamovo kritérium) a dalších vad odlitků. Termofyzikální data materiálů jsou zadány jako konstanty nebo v závislosti na teplotě. Modul umožňuje automatickou generaci termomechanických vlastností na základě chemického složení slitiny. Díky tomu lze sledovat vliv chemického složení na tuhnutí. Dále je možno simulovat vliv exotermických nálitků, izolačních materiálů a chladítek.

Kromě dvou základních modulů zcela dostačujících pro kompletní analýzu plnění a tuhnutí gravitačně litého odlitku do kokily řešeného v experimentální části, disponuje ProCast nadstavbovými moduly. Jsou to například moduly pro analýzu tepelných napětí, modul tepelné radiace, modul pro predikování mikrostruktury, modul pro výpočet materiálových charakteristik, modul elektromagnetismu, modul pro modelování velikosti zrn, modul pro monokrystalické odlitky, modul pro tepelné zpracování včetně tepelného vytvrzování hliníkových slitin a další. Zajímavostí je také nástroj pro automatický návrh nálitků. Po zadání tvaru nálitků a jejich umístění na odlitku simulace provede optimalizaci velikosti nálitků vzhledem ke kritériu nejnižší možné pórovitosti v odlitku [8], [9].

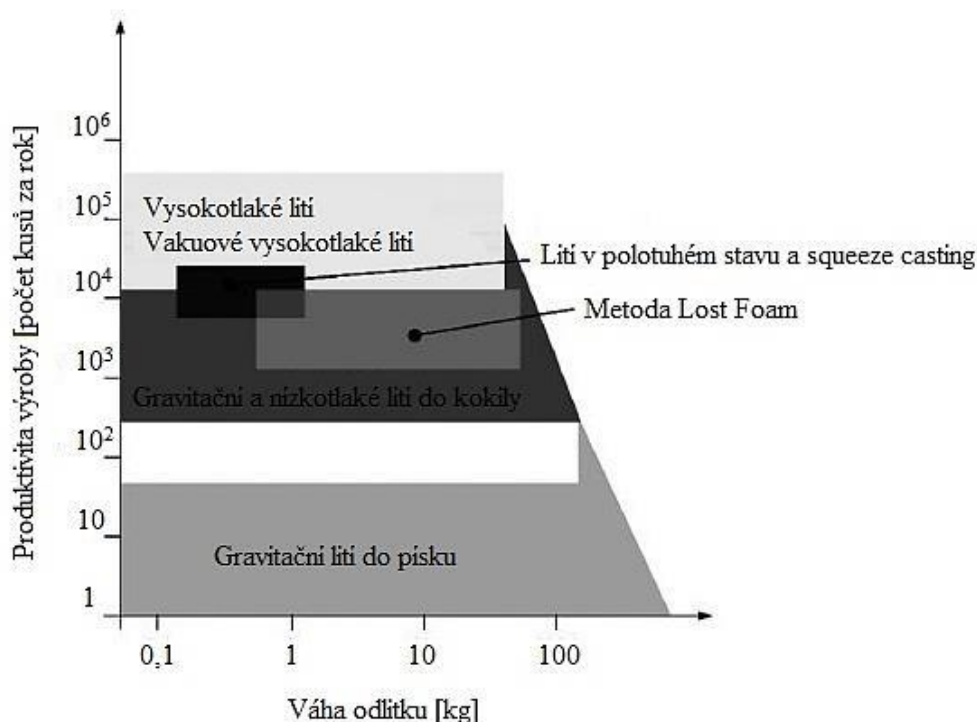
Dále program ProCast doplňuje řada optimalizačních pomůcek a nástrojů začleněných do uživatelského prostředí Visual-Environment. Toto prostředí je uživatelsky přívětivé a usnadňuje průchod procesem simulace formou průvodců pracovních postupů. V rozhraní Visual-Environment jsou obsaženy moduly [8]:

- Visual-Mesh – Obsahuje nástroje pro úpravy a změny importované 3D geometrie za účelem vytvoření výpočtové sítě. Geometrii je zde možné importovat ve formátu IGES, STL, STEP a PARASOLID. Obsahuje také automatické opravy poškozené geometrie, včetně detekce dělicích rovin. Generuje síť metodou FEM z povrchových 3D dat.
- Visual-CAST – Je prostředím pro intuitivní zadávání podmínek slévárenských procesů. Obsahuje rozsáhlou databázi ve slévárenství běžně používaných materiálů, materiálů kovových forem, chladítek, pískových forem a jader, izolačních a exotermických nástavců a keramických filtrů. Je zde obsažen kalkulátor, který je z chemického složení schopen předpovědět termomechanické vlastnosti závislé na teplotě. Poskytuje uživatelský přístup k pokročilým řešitelským pomůckám programu ProCast.
- Visual-Viewer – Je podobně produktivní a uživatelsky přívětivé prostředí, které je určeno pro následnou analýzu výsledků numerické simulace. Umožňuje kompletní analýzu včetně zobrazení animací. Pro zvýšení produktivity práce technologa nabízí automatické generování reportů a práci ve více oknech.



## 2 Gravitační lití slitin hliníku do kovových forem

Předmětem praktické části této diplomové práce je odlitek, který je odléván technologií gravitačního lití do kovové formy, neboli kokily. Kromě této technologie se kovové formy využívají také pro vysokotlaké lití, nízkotlaké lití, lití v polotuhém stavu, squeeze casting a vakuové vysokotlaké lití. Na obrázku č. 5 jsou porovnány tyto technologie odlévání do trvalých forem s technologií lití do pískové formy z hlediska produktivity výroby. Gravitační kokilové lití je využíváno z důvodu své jednoduchosti a metalurgické kvality výsledného odlitku [10].

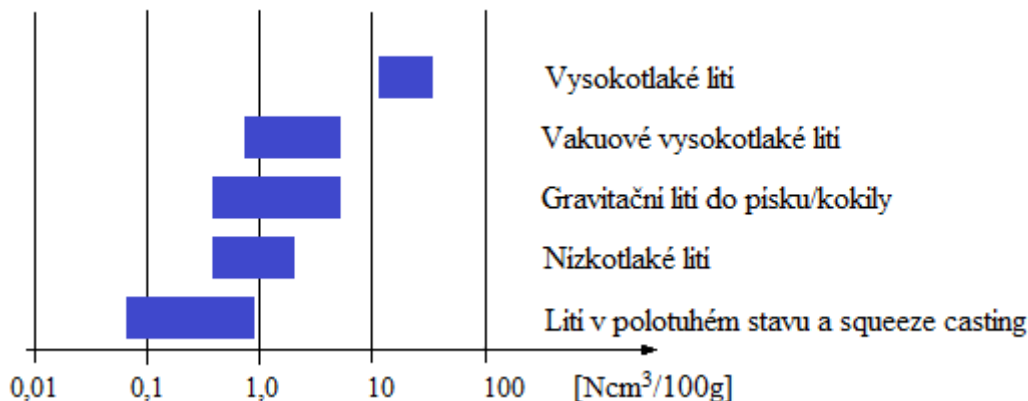


Obr. 5 Srovnání produktivity výroby technologií pro odlévání Al slitin [10]

Gravitační odlévání do kovových forem je ve srovnání s klasickým litím do pískových forem technologií produktivnější. Důležitou skutečností je, že vlastnosti slitin hliníku jsou velmi závislé na intenzitě odvodu tepla ve fázi tuhnutí. V kovových formách se tak dosahuje jemnější struktury odlitku, a s tím souvisejících, výrazně lepších mechanických vlastností. Vzhledem k poměrně nízké teplotě tavení hliníkových slitin vyhovují pro výrobu kokil běžné nelegované oceli [11], [12].

Co se týče návrhu technologie kokily, je zvykem u slitin hliníku používat spodní vtoky. Hliníkové slitiny mají velký sklon k oxidaci, je tedy nutné zajistit co nejklidnější plnění. Pro zachycení vměstků se často používají objemové nebo ploché filtry. Dále je odlitky z hliníkových slitin nutné nálitkovat, protože mají sklon k tvorbě soustředěných staženin, mikrostaženin a ředin. U kokilového lití se v důsledku rychlejšího odvodu tepla vyskytují spíše soustředěné staženiny [12].

Na obrázku č. 6 je uvedeno porovnání sklonu k uzavírání vzduchu v odlitku pro různé technologie. Je nutné brát v úvahu, že se jedná spíše o teoretické srovnání těchto technologií. Obsah vzduchu může být ovlivněn úrovní technologie výroby. Může také záviset na požadavcích na finální odlitek a ekonomických aspektech [4].



Obr. 6 Obsah uzavřeného vzduchu v odlitcích z Al slitin v závislosti na technologii [4]

Hlavními přednostmi gravitačního lití do kokil proti lití do pískových forem jsou [11], [12]:

- Výrazné zvýšení rychlosti odvodu tepla určený součinitelem tepelné akumulace slévárenské formy, které vede k lepším mechanickým vlastnostem.
- Menší heterogenita struktury a nižší sklon k mikrostaženinám a ředinám.
- Zvýšená disperzita nežádoucích intermetalických částic, čímž se omezí jejich nepříznivý vliv.
- Vysoká hladkost povrchu odlitku, která je dána drsností formy a vlastnostmi postřiku nanášeného z důvodu ochrany formy.
- Je možné produkovat odlitky ve vyšší třídě přesnosti.
- Snížení přídavků na obrábění, lze vyrábět odlitky na hotovo.
- Výrobu lze kompletně automatizovat, v případě použití kovových jader není potřeba úpravna formovacích směsí a jaderna.

Tyto přednosti s sebou nesou určité nevýhody [11]:

- Technologii lze použít pouze pro sériovou výrobu.
- Složitější návrh konstrukce kovové formy, popřípadě složitější realizace úprav na kovové formě.
- Kovová forma a jádra kladou odpor při smršťování odlitku a jsou neprodyšná, je tedy důležité dostatečné odvzdušnění formy.

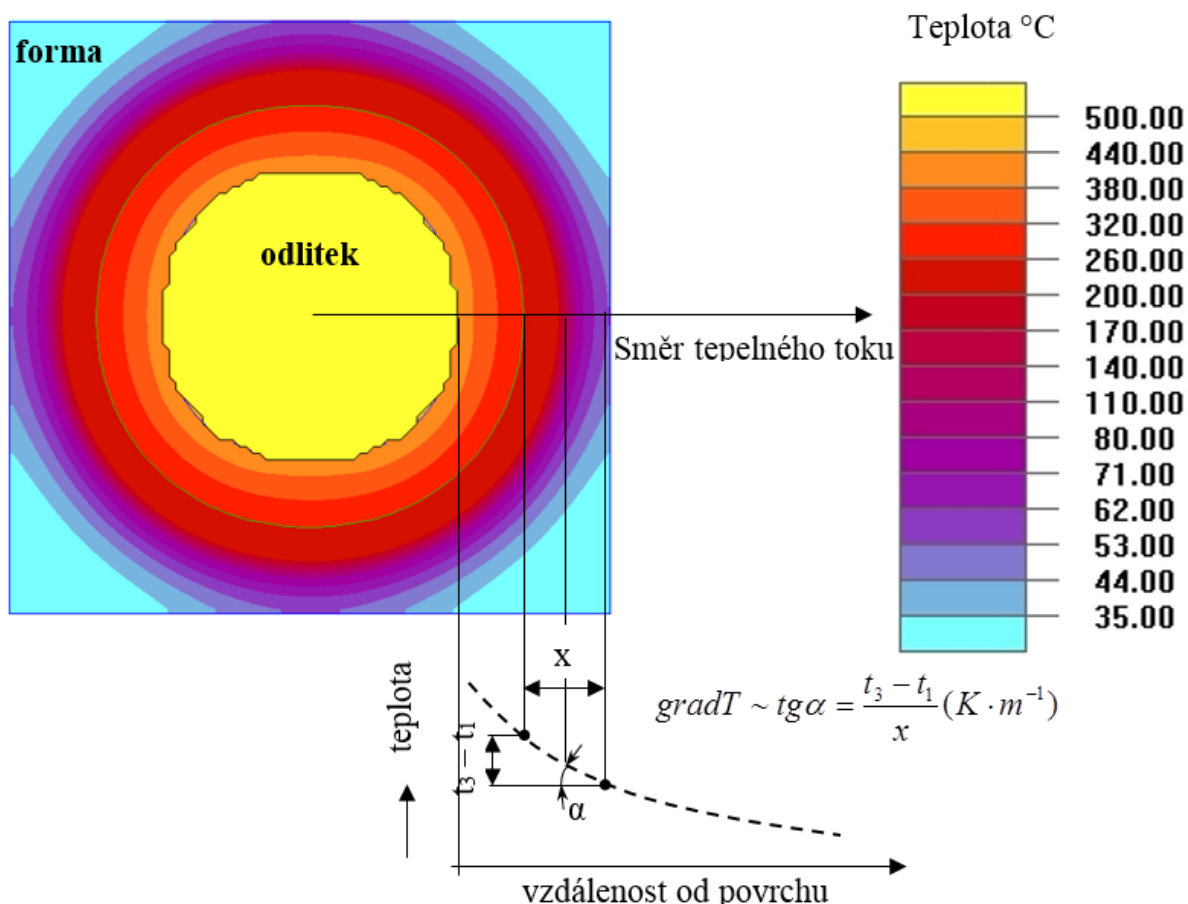
Zařízení pro gravitační kokilové lití může být licí stůl s jednoduchou dělenou kovovou formou s úplnou ruční obsluhou. Sofistikovanější je pak komplexní pracoviště s kokilovými licími stroji s hydraulickým pohonem pro uzavírání a otevírání kokily a pohyb kovových jader [11].

## 2.1 Tepelné děje při tuhnutí odlitků v kovových formách

V předchozí kapitole byly shrnuty rozdíly mezi pískovou a kovovou formou. Nejzásadnější rozdíly jsou způsobeny právě rozdílnou intenzitou odvodu tepla z odlitku při jeho tuhnutí, danou především vyšším součinitelem tepelné akumulace kovové formy oproti pískové. Slévárenská forma, co se týče tepelných dějů, slouží k akumulaci a odvodu tepla do okolí. Děje probíhající na rozhraní tavenina – forma jsou tedy velmi zásadní ve fázi tuhnutí odlitku. Rychlost odvodu tepla z odlitku závisí na [7]:

- tepelných dějů probíhajících v tuhnoucí tavenině,
- tepelných dějů na hranici odlitek – kovová forma,
- tepelně fyzikálních vlastnostech samotné slévárenské formy.

Tepelné poměry mezi odlitkem a formou lze z fyzikálního hlediska popsat jako složitý proces sdílení tepla mezi dvěma tělesy. Odlitek tedy uvolňuje tepelnou energii a forma tuto energii přijímá. Vytváří se tak jisté rozložení teplot odpovídající geometrii odlitku a formy. Teplotní pole vznikající ve formě se až do úplného vychladnutí odlitku stále mění. Na obrázku č. 7 je příklad rozložení teplotního pole válcového odlitku. Rozložení izoterm, tedy ploch spojujících místa se stejnou teplotou, charakterizuje v každém okamžiku teplotní pole. Kolmice na plochy izoterm znázorňují směr maximálního tepelného toku v každém místě. Izotermy se v řezu jeví jako křivky kopírující tvar odlitku [13].



Obr. 7 Rozložení teplotního pole ve válcovém odlitku [13]

Tuhnutí odlitku závisí především na intenzitě odvodu tepla z tekutého kovu do slévárenské formy. Zjednodušeně lze napsat tepelnou rovnováhu mezi uvolněnou energií při tuhnutí odlitku a energií, kterou akumuluje slévárenská forma jako [13]:

$$dQ_O = dQ_F$$

Kde:  $dQ_O$  – přírůstek tepla uvolněného při tuhnutí odlitku [J],

$dQ_F$  – přírůstek tepelné energie, kterou akumuluje forma [J].

Celkové množství tepelné energie uvolněné odlitkem krystalizujícím v intervalu teplot  $T_L$  a  $T_S$  lze vyjádřit jako [13]:

$$Q_O = m_K \cdot \left[ \int_{T_{POČ}}^{T_L} c_L \cdot dT + L_{KR} + \int_{T_S}^{T_X} c_S \cdot dT \right]$$

Po integraci pak rovnice [13]:

$$Q_O = m_K \cdot [c_L \cdot (T_l - T_L) + L_{KR} + c_S \cdot (T_S - T_{KO})]$$

Kde:  $m_K$  – hmotnost kovu [kg],

$c_L$  – měrná tepelnou kapacitu taveniny [J/kg·K],

$c_S$  – měrná tepelnou kapacitu ztuhlé taveniny [J/kg·K],

$L_{KR}$  – latentní teplo (krystalizační teplo) [J/K],

$T_l$  – teplota lití [°C],

$T_L$  – teplota počátku tuhnutí [°C],

$T_S$  – teplota konce tuhnutí [°C],

$T_{KO}$  – konečná teplota odlitku [°C].

### 2.1.1 Tepelné děje v tuhnoucí tavenině

Tepelnou bilanci komplikuje skutečnost, že dříve než vznikne odlitek, probíhá přenos energie mezi tuhnoucí taveninou a formou. Tepelná energie se v tuhnoucí tavenině šíří vedením a prouděním. Pro pohybující se elementární objem taveniny je potřeba uvažovat i změnu její teploty. Tyto tepelné děje v tavenině jsou popsány Fourierovo-Kirchhoffovou rovnicí vedení tepla [7]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = v_x \cdot \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \cdot \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \cdot \frac{\partial T}{\partial z} = a \cdot \nabla^2 \cdot T$$

Kde:  $T$  – teplota,

$t$  – čas,

$a$  – teplotní vodivost taveniny,

$v_x, v_y, v_z$  – rychlost pohybu elementu taveniny v příslušném směru,

$\nabla^2$  – Laplasův operátor.

Dále je sdílení tepla v tavenině podmíněno hydrodynamickými pochody, je tedy potřeba řešit celou soustavu diferenciálních rovnic. Pro plnění slévárenské formy se uplatňuje Navier-Stokesova rovnice [7]:

$$\rho \cdot v' + v \cdot \text{div} (\rho \cdot v) = \rho \cdot g + \text{grad} (p) + \nu \Delta v$$

Kde:  $\rho$  – hustota proudící taveniny,  
 $v$  – rychlost,  
 $p$  – tlak,  
 $\nu$  – součinitel kinetické viskozity.

Navíc platí podmínka kontinuity pro nestlačitelnou kapalinu [7]:

$$\text{div} v = 0, (\rho = 0)$$

### 2.1.2 Tepelné děje na rozhraní odlitku a formy

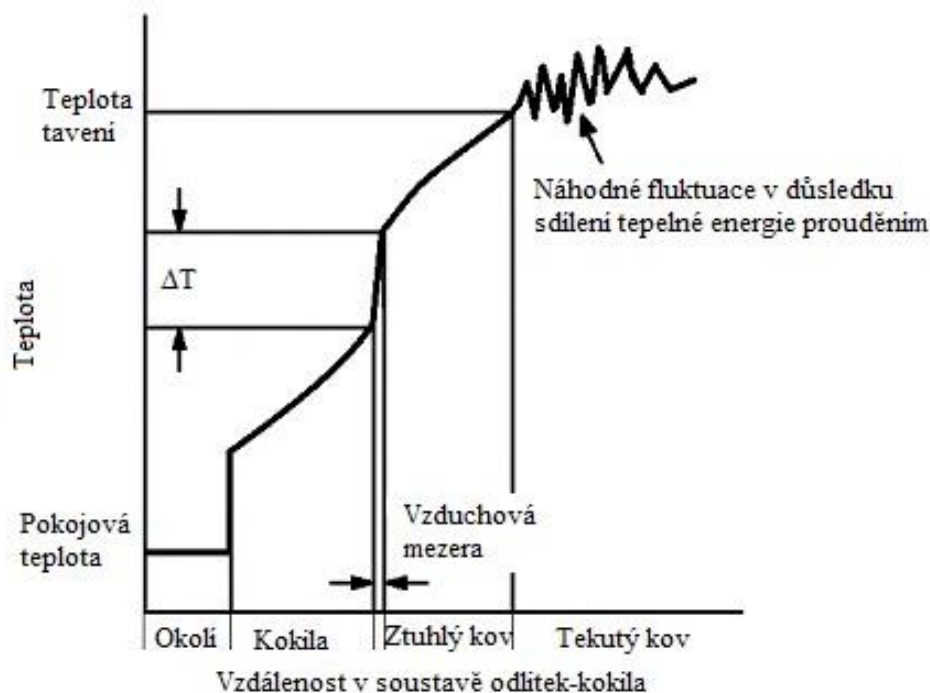
Obecně se přenos tepelné energie z tuhnoucího odlitku do slévárenské formy může realizovat vedením (kondukcí), prouděním (konvekcí) a sáláním (radiací). Sdílení tepla běžně probíhá současně vedením a prouděním. Součinitel tepelné vodivosti hraniční vrstvy pak udává intenzitu přestupu této tepelné energie. V případě kovových forem mezi lícem formy a již ztuhlou vrstvou odlitku dochází ke vzniku vzduchové mezery. Zde se navíc realizuje také přenos tepelné energie sáláním. Intenzitu v tomto případě udává součinitel prostupu tepla vzduchovou mezerou. Na obrázku č. 8 je průběh teplotního profilu odlitku tuhnoucího v kovové formě [7], [14].

Pro zjednodušení je často uvažován těsný styk formy a odlitku, resp. tekutého kovu. Teplotní podmínky na rozhraní odlitek – forma mohou být popsány Biotovým číslem (kritériem). Jinými slovy se jedná o kritérium podobnosti pro přestup tepla vedením na tomto rozhraní [7].

Biotovo číslo pro kovovou formu (analogicky i pro odlitek) [7]:

$$Bi_F = \frac{\Delta T_F}{\Delta T_O} = \frac{X_F}{\frac{\lambda_F}{\alpha_D}}$$

Kde:  $\Delta T_F$  – rozdíl teplot ve formě,  
 $\Delta T_O$  – rozdíl teplot v odlitku,  
 $X_F$  – charakteristický rozměr formy,  
 $\lambda_F$  – tepelná vodivost formy,  
 $\alpha_D$  – součinitel přestupu tepla mezi odlitkem a formou.



Obr. 8 Teplotní profil v soustavě odlitek-kokila [14]

Z určené hodnoty Biotova kritéria je možno získat tři případy intenzity přestupu tepla [7]:

- $Bi_F \gg 1$  – v příčném průřezu odlitku se vytváří mírný teplotní gradient, tepelná vodivost materiálu odlitku převyšuje přestup tepla z odlitku do formy (typické podmínky u pískových forem).
- $Bi_F \sim 1$  – v příčném průřezu odlitku je přibližně stejný teplotní gradient jako ve formě (typické podmínky u nechlazených kovových forem).
- $Bi_F \ll 1$  – v tomto případě je velká tepelná propustnost na rozhraní odlitek – forma v porovnání s tepelnou propustností odlitku. Tepelná vodivost materiálu odlitku nestačí vyrovnávat teploty a v příčném průřezu odlitku se tak vytváří strmý teplotní gradient (typické podmínky u intenzivně chlazených kovových forem).

Jak již bylo uvedeno, ve skutečnosti do popisované problematiky vstupuje více faktorů, shrnutých označením „spára“ (mezera). Při rychlém ochlazení v kokile v důsledku smršťování vzniká mezi odlitkem a kokilou plynová vrstva (zde se realizuje přestup tepla vedením a sáláním, proudění lze zanedbat, protože je vrstva velmi tenká). Dále do označení „spára“ patří oxidická vrstva, která se vytvoří na povrchu odlitku. V této oxidické vrstvě se realizuje přestup tepla vedením. „Spára“ zahrnuje také nátěr nebo nástřik líce kokily (zde se také realizuje přestup tepla vedením). V součtu tyto faktory přináší z pohledu intenzity přenosu tepelné energie mezi odlitkem a kokilou přenosový tepelný odpor. Ten závisí na součiniteli prostupu tepla v oblasti „spáry“. Tato záležitost je mnohem komplikovanější tím, že se „spára“ nevytváří kolem celého odlitku. Vytváří se především ve směru velkého lineárního smrštění odlitku. Obvykle se nevytváří na spodní straně odlitku. Na vytváření této vrstvy má také vliv tepelná dilatace kokily v důsledku jejího zahřátí tekutým kovem [7].

### 2.1.3 Tepelné děje v kokilách

Slévárenská forma má schopnost tepelnou energii z tuhnoucího odlitku akumulovat a odvést do okolního prostředí. Materiál kovové formy je oproti pískové homogenní a teplo se v ní šíří především vedením. Mírou přenosu tepla je hustota tepelného toku a lze ji vyjádřit Fourierovým zákonem. Závisí na tepelné vodivosti formy a teplotním gradientu ve formě. Kromě dříve zmíněných faktorů sehrává svoji roli také tloušťka stěny kokily. Na ní závisí dilatační vlastnosti kokily, které ovlivňují vznik plynové vrstvy mezi odlitkem a kokilou. Pokud je kokila dostatečně tlustostěnná, tekutý kov ji neprohřeje natolik, aby se deformovala, a plynová mezera téměř nevzniká (stále může vznikat v důsledku stahování odlitku) [7].

Čím je stěna kokily tlustší, tím akumuluje více tepla. Velký vliv má počáteční teplota formy, protože na ní přímo závisí výchozí tepelná kapacita formy. Dalším důležitým faktorem je teplota vnějšího povrchu formy. Tlustostěnná kokila se na vnějším povrchu neprohřeje na výrazně vyšší teplotu než je teplota okolí a nedochází k výměně tepla. Naopak tenkostěnná bude mít vnější povrch prohřátý na teploty vyšší a teplo se bude s okolím vyměňovat intenzivněji. Z toho plyne, že skrz tenkostěnnou kokilu se spíše odvádí teplo do okolí a tlustostěnná je více akumulátorem [7].

Ochlazovací účinek formy je možné komplexně popsat součinitelem tepelné akumulace [7]:

$$b_F = \sqrt{c_F \cdot \rho_F \cdot \lambda_F}$$

Kde:  $c_F$  – měrná tepelná kapacita materiálu slévárenské formy,  
 $\rho_F$  – hustota materiálu formy,  
 $\lambda_F$  – tepelná vodivost formy.

Tento součinitel lze stanovit z hodnot podle uvedeného vztahu. Nejsou pak ovšem vystiženy podmínky, ke kterým dochází v soustavě forma – odlitek. Dále se uplatňují různé experimentální metody. Kromě toho je možné využít pro určení  $b_F$  numerické metody.

### 2.1.4 Metody řešení tuhnutí odlitků

Tepelné děje v soustavě „odlitek – slévárenská forma – okolí“ lze popsat fyzikálně-matematickými výpočty. Jelikož je ale fyzikální podstata těchto dějů velmi složitá, jsou výpočty komplikované. Vychází z Biotových a Fourierových předpokladů. Obecně lze metody řešení tuhnutí odlitků rozdělit do čtyř skupin [7]:

- Matematické řešení
- Aproximační metody
- Experimentální studium průběhu tuhnutí
- Metody modelové techniky

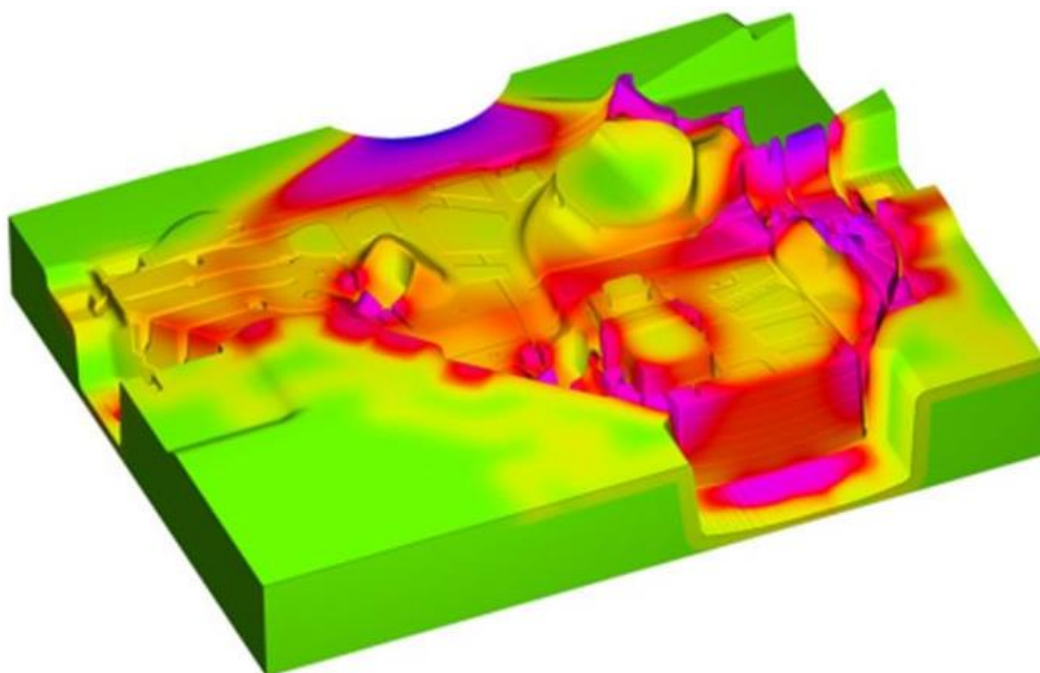
Metody modelové techniky spočívají ve stanovení průběhu tuhnutí na modelech a aplikaci výsledků na reálné odlitky. Matematické vztahy odvozené z odpovídající diferenciální rovnice jsou základem teorie podobnosti, která se zde uplatňuje. V posledních desetiletích se právě

tyto techniky rozšířily na simulační výpočty tuhnutí a chladnutí odlitků. S dnešní úrovní výpočtové techniky jsou nejvýhodnějším prostředkem řešení numerické metody [7].

Matematické metody zjednodušují Furierovu diferenciální rovnici a nezahrnují tak tepelné děje mezi odlitkem a formou (např. teplotu lití, velikost a tvar odlitku, vznik plynové mezery, nástřik formy, atd.). Z toho plynou nepřiliš přesné výsledky. Navíc jak při řešení matematickém, tak aproximačním se nepočítá se skutečností, že tepelně-fyzikální vlastnosti jsou závislé na teplotě. Zejména z těchto důvodů nemají v dnešní době analogické metody řešení tepelných dějů významné uplatnění [7].

## 2.2 Tepelný cyklus formy

Při odlévání do trvalých forem prochází forma během výroby teplotním cyklem. Tento cyklus v podstatě začíná u pokojové teploty formy. U gravitačního lití většinou před litím prvního kusu proběhne přehřev kokily na provozní teplotu. Po každém odlitém kusu se rozložení teplotního pole ve formě mění. To je způsobeno přestupem tepla z tuhnoucího odlitku do kokily. Naopak po vytažení odlitku z kokily její teplota intenzivně klesá. Jak bylo dříve zmíněno, důležité tepelně-fyzikální vlastnosti materiálu kokily jsou závislé na teplotě. Z toho plyne, že aktuální teplota kokily, při odlévání konkrétního kusu v sérii, má zásadní vliv na výsledné vlastnosti odlitku a také na sklon ke vzniku slévárenských vad. V ideálním případě, pro udržení konstantních vlastností odlitků, je třeba zajistit konstantní teplotní cyklus kokily během výroby. Toho je možné dosáhnout chlazením kokily. Možnostmi jsou například ostřik formy nebo chlazení ofukem. Pro navržení optimálního teplotního cyklu pro výrobu odlitků do trvalých forem je numerická simulace cenným nástrojem. Na obrázku č. 9 je příklad zobrazení rozložení teplot v kovové formě vypočtené numerickou simulací.



Obr. 9 Rozložení teplotního pole ve formě [15]



Životnost trvalých forem závisí na mnoha faktorech a právě opakující se tepelné procesy patří k nejpodstatnějším z nich. Jsou příčinou praskání stěn a mapování pracovních povrchů kokil. V důsledku tepelného cyklu dochází v kokile ke vzniku tepelných pnutí. Ta jsou způsobena vzájemným působením jednotlivých částí stěny kokily s různou teplotou. Přesněji dochází k tepelné dilataci jednotlivých pomyslných vrstev kokily, které mají různou teplotu. Vrstva s vyšší teplotou má snahu se více roztahovat a stlačuje chladnější vrstvu, která jí v tom brání. V důsledku toho mohou ve stěně kokily vznikat praskliny. Pnutí v kokile může být zbytkové nebo trvalé. Zbytkové pnutí se uvolní v okamžiku vyrovnání teplot kokily, nebo při vychladnutí na pokojovou teplotu. Trvalá pnutí naopak zůstávají v kokile i po vychladnutí. Doba uvolnění trvalých pnutí je závislá zejména na materiálu. Jelikož je kokila během lití nerovnoměrně ohřívána, po každém pracovním cyklu dochází k akumulaci trvalých pnutí. K prasknutí kokily dochází sečtením těchto pnutí v určitém pracovním cyklu, děje se to ovšem především u hutnických litinových kokil. Častějším jevem u slévárenských kokil je mapování pracovního povrchu kokily, které vzniká ve fázi chladnutí kokily po vyjmutí odlitku z důvodu vzniklého tahového napětí. Jedná se o síť trhlinek vytvářející čtyř až pětiboké obrazce [4], [7].

### 3 Rozbor vybraného odlitku

Úkolem praktické části této diplomové práce bylo analyzovat stávající technologii liti vybraného odlitku a posléze navrhnout řešení vyskytujících se problémů. První část experimentální části se věnuje zdokumentování a analýze vyskytujících se slévárenských vad. Druhá část je řešena formou virtuálního experimentu. Hlavním nástrojem je numerická simulace v programovém prostředí ProCast. Pozornost je věnována především tuhnutí odlitku a slévárenským vadám, které činí slévárně u tohoto odlitku dlouhodobě problémy. Cílem je zjistit numerickými výpočty možné příčiny vyskytujících se vad a doporučit slévárně možná nápravná opatření.



Obr. 10 Fotografie řešeného odlitku 1



Obr. 11 Fotografie řešeného odlitku 2

Odlitek, který je předmětem této části diplomové práce, byl vybrán ve spolupráci s firmou Slévárna a modelárna Nové Ransko s.r.o. Co se týče použití odlitku, jedná se o frézovací hlavu CNC frézky. Díl slévárna dodává společnosti Mecawel, která výrobek dále exportuje do Německa. Technologie výroby tohoto dílu je gravitační lití do kovové kokily. Materiál odlitku je slitina hliníku AlSi12, která má pro výrobu odlitků široké využití. Na obrázcích č. 10 a č. 11 jsou fotografie řešeného odlitku. Zde je třeba zmínit, že nejprve byl slévárnou pro tuto diplomovou práci vybrán jiný odlitek, litý technologií gravitačního lití do pískové formy. U tohoto původního odlitku ovšem nebyly zjištěny žádné zásadní problémy a ani analýzou pomocí simulace v programu ProCast se nepřišlo na žádné nevyhovující slévárenské vady. Po domluvě se slévárnou byl tedy vybrán tento kokilový odlitek, který slévárně v současnosti činí značné problémy a je aktuální potřebou určit možné příčiny vzniklých problémů.

### 3.1 Typ slitiny

Jak již bylo výše uvedeno řešený odlitek je odléván ze slitiny hliníku AlSi12. Tato slitina je vhodná pro odlévání do pískových forem, do kokil a pro nízkotlaké lití. Slitinu se doporučuje modifikovat sodíkem nebo stronciem, zejména u odlitků s výrazně rozdílnými tloušťkami stěn. Slitinu nelze vytvrzovat, používá se tedy v litém stavu. Používá se například na lopatky, skříňové odlitky, tělesa pump, žebrovaná tělesa a podobně [12].

V tabulce č. 1 je uvedeno chemické složení slitiny, ze které je odléván řešený odlitek. Jedná se o binární eutektický silumin. Obsah doprovodných prvků je omezen nízkými hodnotami [12].

Tab. 1 Chemické složení slitiny AlSi12 v procentech [16]

Si	Fe	Mn	Ti	Cu	Zn	Ostatní	Al
10,5 – 13,5	max 0,55	max 0,35	max 0,15	max 0,05	max 0,1	max 0,05	zbytek

Mechanické vlastnosti binárních siluminů jsou poměrně nízké, jejich zvýšení se dosahuje až u hliníkových slitin s přísadou prvků s vyšší rozpustností v tuhém roztoku  $\alpha(\text{Al})$ , jako jsou Cu a Mg. V tabulce č. 2 jsou uvedeny přibližné mechanické vlastnosti při lití do pískové formy a při lití do kovové formy. Při odlévání do kovové formy jsou mechanické vlastnosti mírně lepší. Tažnost závisí především na morfologii eutektického křemíku. Výrazně se tedy zlepšuje modifikací eutektika. Pro zvýšení tažnosti je vhodné provést rozpouštěcí žíhání a následné ochlazení do vody. Slitiny jsou dobře obrobitelné a ke zlepšení obrobitelnosti rovněž přispívá modifikace. Odolnost proti korozi je dostatečná v oblasti použití, zhoršuje se s rostoucím obsahem mědi. Primární zrno se ve struktuře zjemňuje přísadou titanu [12].

Tab. 2 Mechanické vlastnosti slitiny AlSi12 v litém stavu [16]

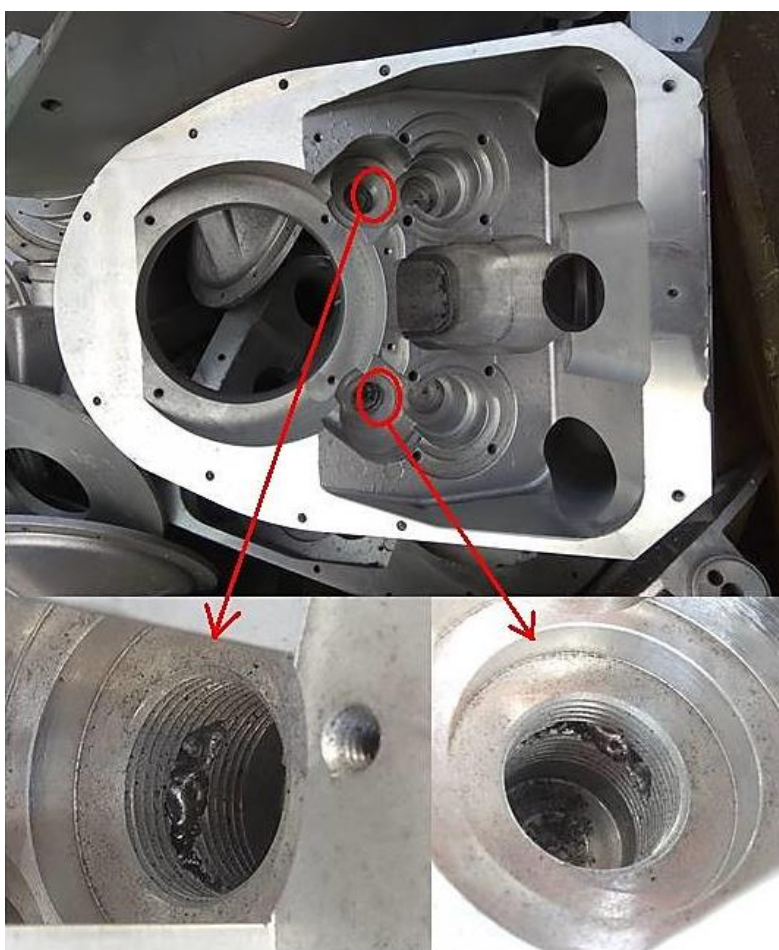
Gravitační lití do pískové formy				Gravitační lití do kokily			
R <sub>m</sub> [MPa]	R <sub>p0,2</sub> [MPa]	A [%]	HBW	R <sub>m</sub> [MPa]	R <sub>p0,2</sub> [MPa]	A [%]	HBW
150	70	5	50	170	80	6	55

Slévárenské vlastnosti jsou dobré zejména se zvyšujícím se obsahem křemíku. Při eutektickém složení je minimální šířka dvoufázového pásma. Tím se zlepšuje zabíhavost a zmenšuje se rozsah staženin. Kladně zde působí křemík, který během tuhnutí zvětšuje svůj objem a dochází ke kompenzaci stahující se hliníkové matrice. Pro srovnání má modifikovaný silumin eutektického složení objemový úbytek při tuhnutí asi 3 % na rozdíl od asi 6,5 % u čistého hliníku [12].

### 3.2 Současný stav

Řešený odlitek pro hlavu CNC frézky se ve Slévárně a modelárně Nové Ransko odlévá již od roku 2009. Dosud bylo odlito přibližně 1000 kusů této položky. Vždy se jedná o expedici série těchto odlitků po 31 kusech. Během posledních deseti let byla tato série objednána celkem 32 krát. Z toho plyne, že výroba tohoto odlitku probíhá na základě objednávky přibližně třikrát ročně.

Na obrázku č. 12 je fotografie neshodného odlitku po dokončení třískového obrábění. Je zde patrná dutina, která je jistě slévárenskou vadou. První předpoklad je, že se jedná o staženinu. Nachází se na obvodu neprůchozích děr předlitých středovým jádrem, do kterých se posléze obrábí závit.



Obr. 12 Slévárenská vada v místě obráběného závitu



Podle informací poskytnutých Slévárnou a modelárnou Nové Ransko, se od roku 2009 do roku 2016 pohybovalo procento neshodné výroby u těchto odlitků v průměru kolem 20 %. Ve snaze zlepšit tento stav bylo v roce 2016 provedeno nápravné opatření. Středové jádro bylo upraveno tak, aby bylo možné jej zvnějšku (tj. do jeho dutiny) chladit vodou. Tento zásah nepřinesl očekávané změny. Procento neshodných kusů se významně nezměnilo. Problémy se vystupňovaly v letošním roce, kdy u poslední odlité série bylo reklamováno 65 % kusů. Je důležité zmínit, že třískové obrábění na odlitku se neprovádí ve slévárně, ale až u zákazníka. Na odlitku se běžně neprovádí defektoskopické zkoušky, ale pouze vizuální kontrola, pomocí které přítomné vady nelze odhalit. Vady vedoucí k vyřazení odlitku jsou tak objeveny až u zákazníka, po provedení třískového obrábění. Procento neshodné výroby u této položky tedy přímo odpovídá procentu reklamovaných kusů zákazníkem. Další prováděnou kontrolou jsou zkoušky mechanických vlastností, které se provádí na odděleně litých tyčích. Výsledky mechanických hodnot vychází bez problémů v rámci tolerancí.

### 3.2.1 Technologie výroby

Jak již bylo řečeno, jedná se o gravitační odlévání do kovové kokily. Dělicí rovina této kokily prochází středem odlitku. Po složení kokily jsou do ní vsunuta dvě jádra, která jsou rovněž kovová. Na obrázku č. 13 je fotografie kokily s bočním jádrem, které se zavádí do kokily šikmo pomocí vodících tyčí. Na stejném obrázku je možné vidět celkem dva vtoky. Pro plnění kokily se používá pouze vtok nacházející se blíže středovému jádru (na obrázku více vlevo). Druhý, který je přilehlý bočnímu (šikmému) jádru, se při odlévání do této kokily nikdy nepoužíval a je od zahájení výroby zaslepený.



Obr. 13 Fotografie kokily

Na obrázku č. 14 je středové jádro, které je zaváděno do kokily shora. Středové jádro je navíc chlazeno studenou vodou, která se do dutiny jádra dopravuje hadicí. Žádné jiné chlazení (např. kokily vzduchem nebo vodou) se nevyužívá. Uplatňuje se pouze přestup tepla radiací do okolního prostředí ve fázi otevření kokily a vyjmutí odlitku. Obě jádra (středové i boční) jsou vybavena odvzdušňovacími otvory. Posledním jádrem je spodní jádro umístěné ve spodní desce kokily, které tvoří průchozí otvor (viz obrázek č. 11 vpravo dole).



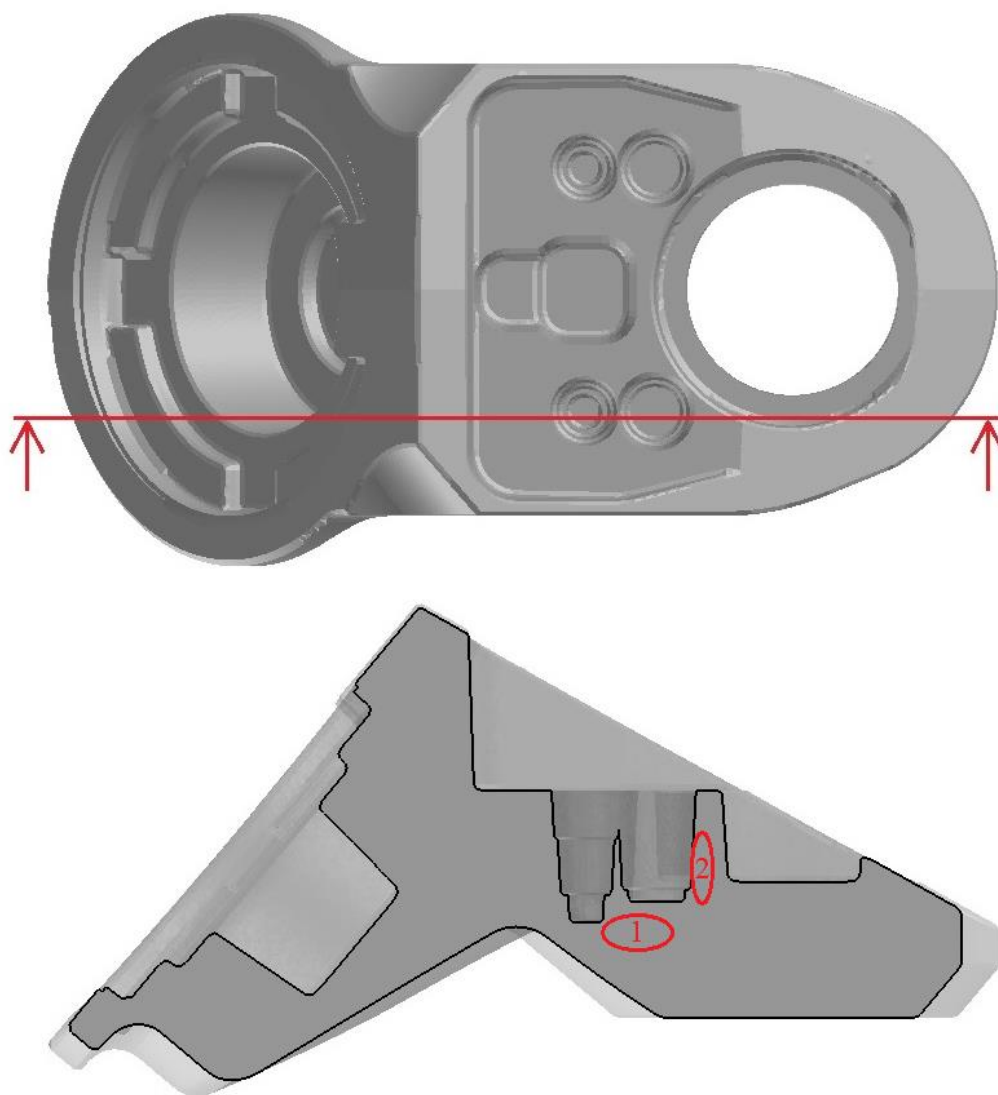
Obr. 14 Chlazené středové jádro

Je třeba zmínit, že většina parametrů technologie výroby není nijak specifikována v technologické kartě postupu výroby odlitku. Je zde zaveden pouze materiál odlitku (AlSi12), surová hmotnost odlitku (36 kg) a teplota lití (720°C). Některé další podmínky výroby byly sděleny ústně zaměstnanci technologického úseku a pracovníky výroby.

Přehřev kovové formy a jader se provádí plamenem na teplotu přibližně 300 °C. Tato teplota ovšem není nijak kontrolována. Výrobní cyklus byl stanoven 4 kusy za hodinu, tedy 15 minut na výrobu jednoho kusu. Čas rozebrání kokily a vyjmutí odlitku závisí na zkušenostech pracovníka. Tepelný cyklus formy během lití nebyl nijak blíže specifikován. Kokila a jádra jsou vyrobená z oceli stejné značky. Pro filtraci tekutého kovu je využíván pěnový filtr. Pro omezení přestupu tepla do kokily se využívá izolačních nátěrů u všech nálitků i vtokové soustavy. Nátěry se aplikují také na jádra. Během tuhnutí odlitku se několikrát provádí dolévání tekutého kovu do středového nálitku. Nevyužívá se žádných izolačních nebo extermických zásypů nálitků. Na základě poskytnutého videa odlévání byla stanovena doba lití na 18 sekund. Zmíněné chlazení středového jádra vodou se provádí cca 9 minut po naplnění kokily tekutým kovem. Množství vstupující vody není nijak předepsáno ani regulováno. Na základě videa lze odhadnout, že pracovník plní jádro vodou dvakrát po cca pěti sekundách. Po zavedení tohoto chlazení jako nápravného opatření se četnost výskytu vad, ani jejich charakter nijak nezměnil.

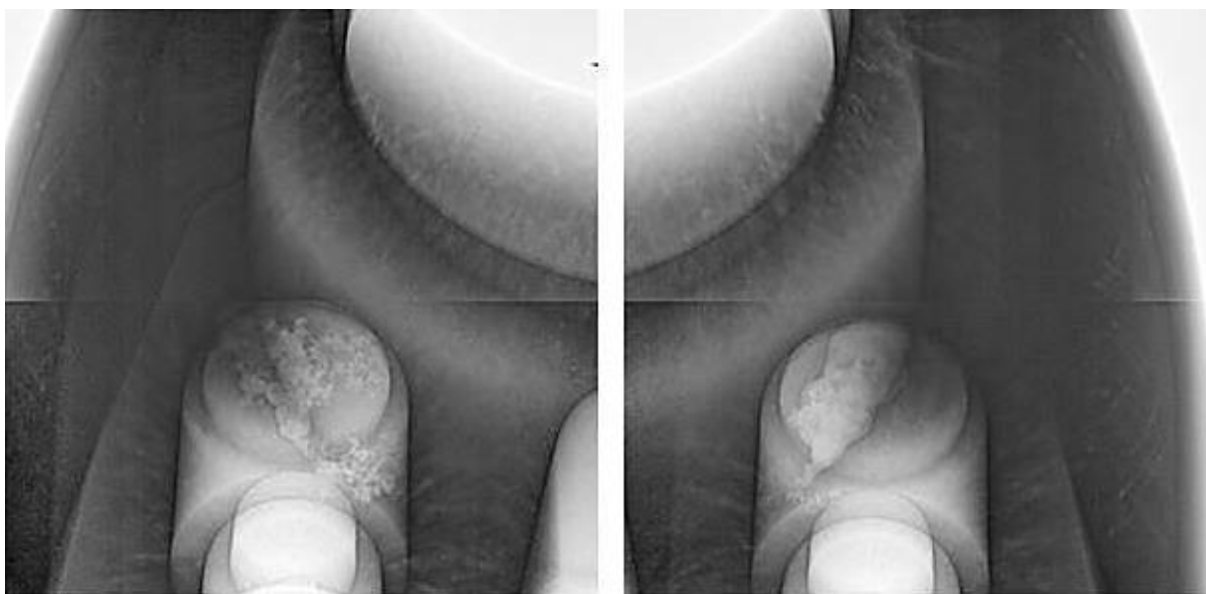
### 3.2.2 Analýza vyskytujících se slévárenských vad

Slévárna a modelárna Nové Ransko vyrábí řešený odlitek již deset let. Neshodné odlitky činí průměrně dvacet procent. Příčinou je slévárenská vada objevující se těsně pod povrchem předlitých otvorů pro následné třískové obrábění závitů. Vadu lze detekovat vizuální kontrolou po obrobení závitu, jak je možné vidět na obrázku č. 12. Reklamáce od zákazníka je nutné řešit odlitím náhradních kusů, což je velmi neekonomické. V poslední kampani bylo z 31 vyrobených kusů 18 neshodných. Jelikož slévárna nedisponuje zařízením pro defektoskopii, nechala si externě provést rentgenovou prozařovací zkoušku. Na obrázku č. 15 jsou specifikována místa, kde se vady vyskytují. V oblasti označené číslem 2 je vada zdokumentována na obrázku č. 12. V oblasti označené číslem 1 byla vada detekována rentgenovou zkouškou. Jelikož se tato zkouška běžně neprovádí, tak nelze určit, zda se vada v těchto místech vyskytuje pravidelně. Vada v oblasti 1 pravděpodobně nezasahuje do přídavku na obrábění, vizuální kontrolou tedy nemusí být odhalena.

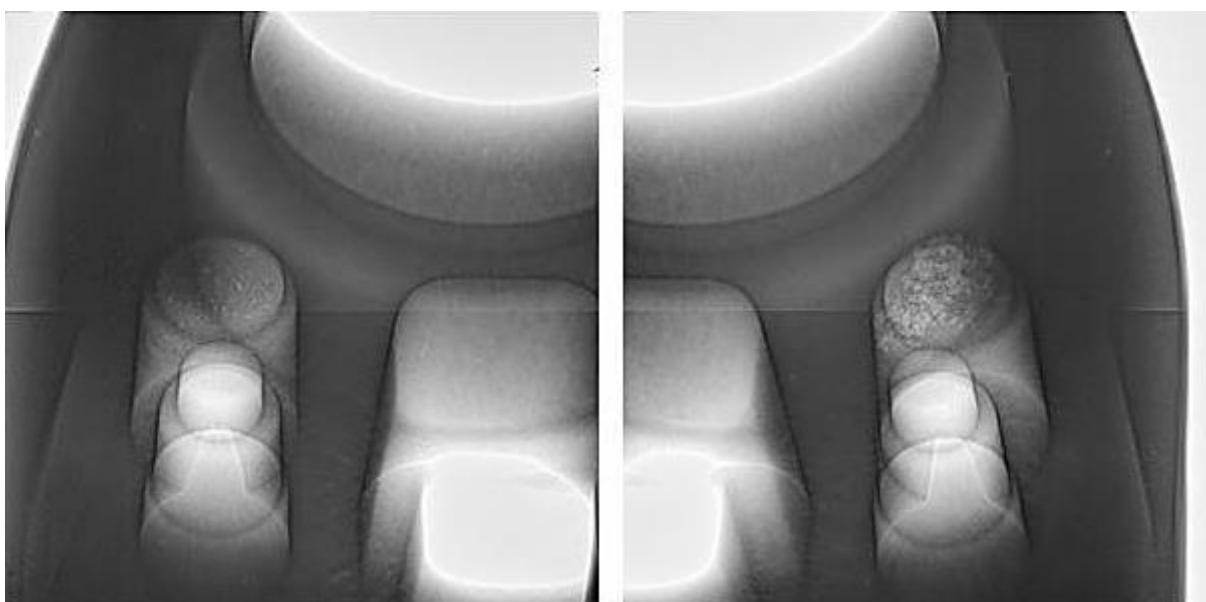


Obr. 15 Místa výskytu slévárenských vad (oblast 1 – dutina pod předlévaným otvorem detekovaná rentgenovou zkouškou, oblast 2 – dutina v přídavku na obrábění závitu)

Na obrázcích č. 16 a č. 17 jsou rentgenové snímky analyzované vady. Celkem byly rentgenovány čtyři předlité otvory (na dvou odlitcích). Na třech sledovaných místech (01, 02, 04) je zřetelný výskyt dutiny pod neprůchozím otvorem, který je tvořen středovým jádrem. V místě označeném 03 nebyla rentgenovou zkouškou detekována žádná zřetelná slévárenská vada. Dutiny se na těchto kusech nenachází vedle předlévaných otvorů pro závity, jako na neshodném odlitku na obrázku č. 12, ale pod nimi. Je tedy zřejmé, že dutina se netvoří u všech odlitků na stejném místě. Potvrzuje to teorii, že vady se v odlitku mohou vyskytovat pravidelně, ovšem ne u všech kusů se objeví v přídatku na obrábění. Měnící se místo výskytu vady může ovlivňovat více faktorů, které budou předmětem zmíněného virtuálního experimentu.



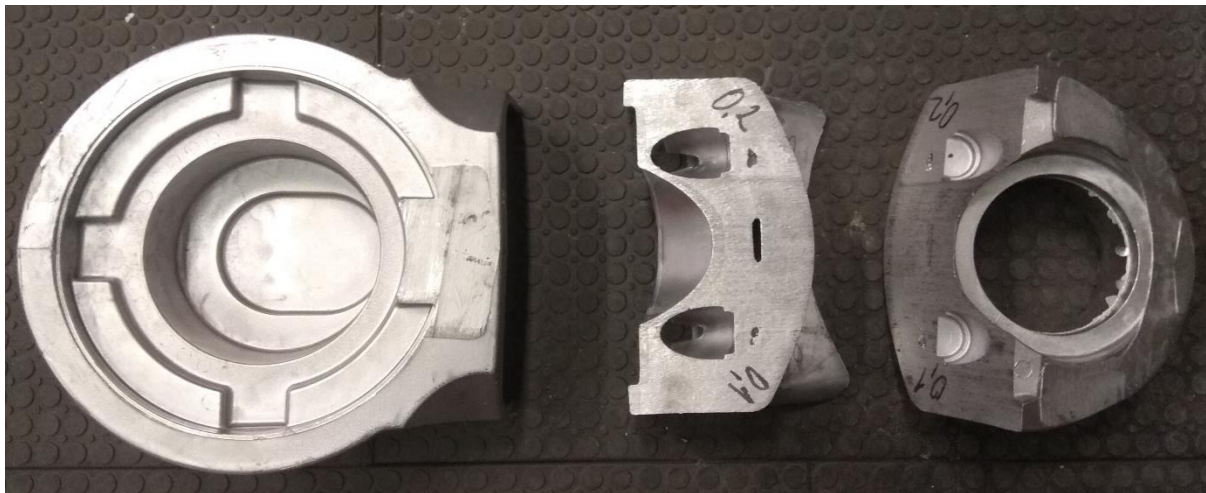
Obr. 16 Rentgenové snímky odlitku 1 (označení: 01 – vlevo, 02 – vpravo) [17]



Obr. 17 Rentgenové snímky odlitku 2 (označení: 03 – vlevo, 04 – vpravo) [17]

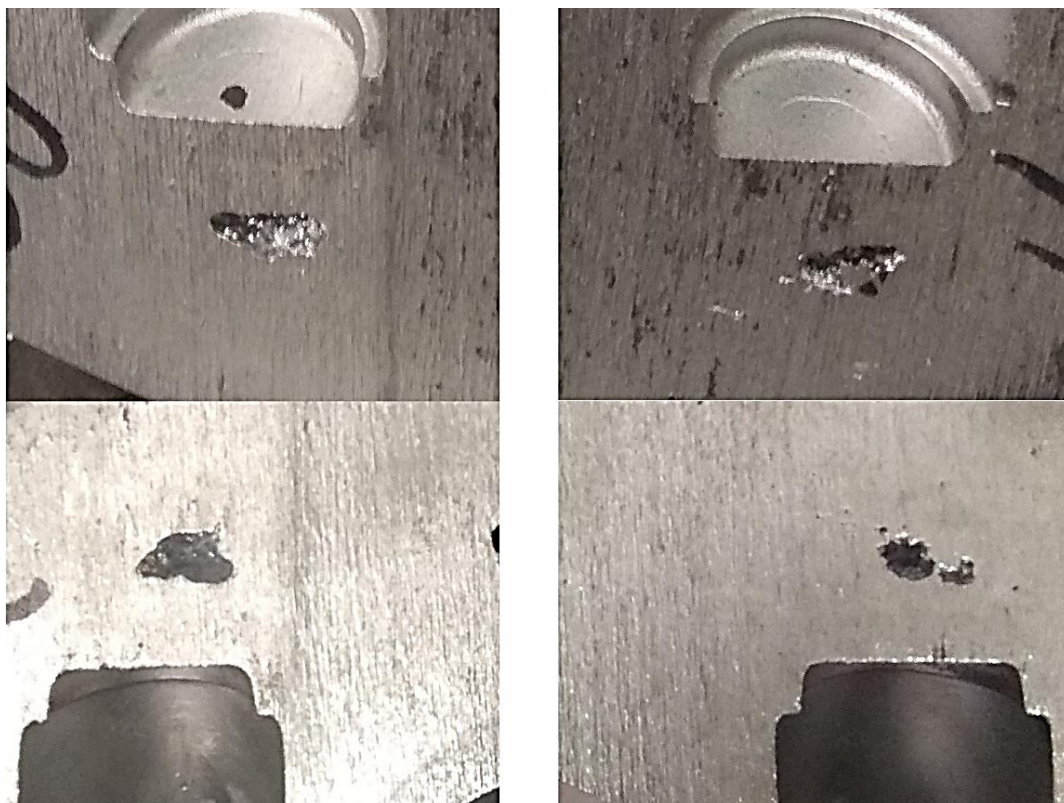


Oba rentgenované odlitky byly slévárnou poskytnuty pro bližší analýzu detekovaných vad. Hrubé dělení odlitků bylo provedeno na pásové pile se suspenzí chlazeným pilovým listem. Řez byl proveden v místech vad detekovaných pod neprůchozími předlévanými otvory. Na obrázku č. 18 je fotografie upřesňující, v kterých místech byly provedeny řezy pásovou pilou.



Obr. 18 Rozřezaný odlitek

Detailnější fotografie jsou potvrzením rentgenových snímků. Na obrázku č. 19 je řez odlitkem 1 (tzn. místa 01, 02). Byl potvrzen výskyt dutin v hloubce přibližně jeden centimetr pod předlitými neprůchozími otvory. Velikost vyskytujících se dutin je přibližně 1 až 2 cm.



Obr. 19 Řez odlitkem 1 (vlevo místo 01, vpravo místo 02)

Na obrázku č. 20 je řez odlitkem 2 (tzn. místa 03, 04). Bylo potvrzeno, že se v místě 03 nevyskytuje žádná rozsáhlá dutina. Jsou zde ovšem vizuálně detekovatelné menší dutiny o rozměrech přibližně 1 mm.

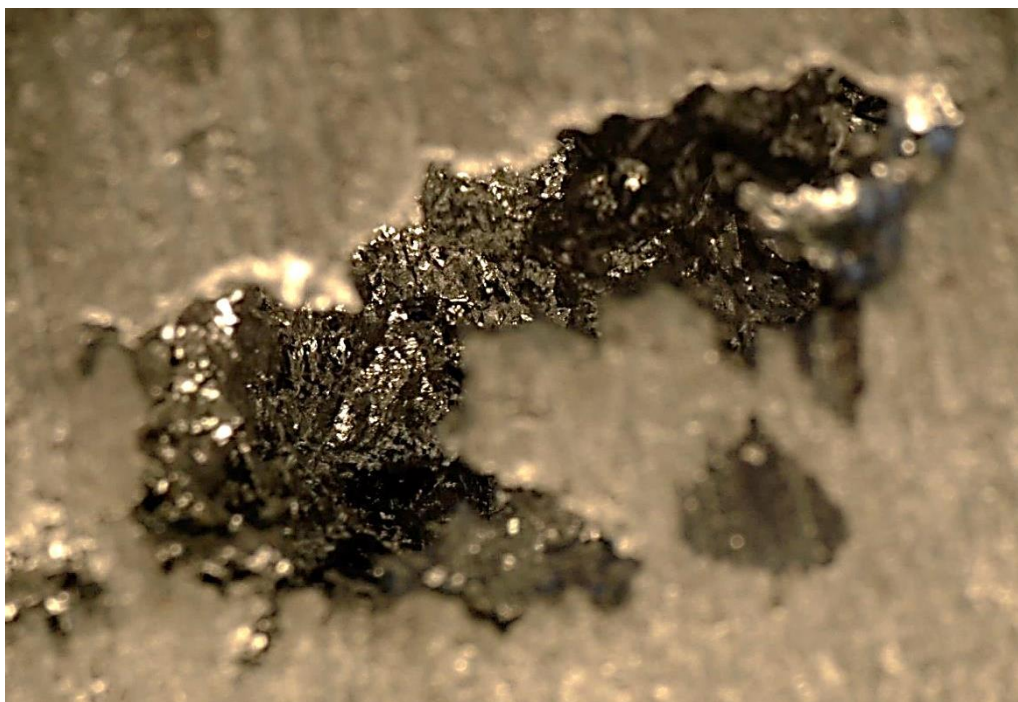


Obr. 20 Řez odlitkem 2 (vlevo místo 03, vpravo místo 04)

Následné přesnější dělení se realizovalo na laboratorní metalografické pile. Na této pile se řez provádí brusným kotoučem od firmy Struers, který je taktéž chlazený suspenzní kapalinou. Řez je hladší a dutiny jsou méně deformované. K bližší analýze popisované vady byla využita optická stereolupa (stereoskopický mikroskop). Tento nástroj je nejvhodnější pro zkoumání vad typu dutin nebo vměstků pro svou vysokou hloubku ostrosti. Stereolupa je vybavena fotoaparátem pro pořizování snímků.

Na obrázku č. 21 je snímek jedné z dutin detekovaných pod neprůchozími předlévanými otvory. Na základě tohoto snímku lze konstatovat, že se jedná o staženinu (velikost přibližně 1 – 2 cm). Za srovnatelné, co se týče charakteristických znaků, se dají považovat staženiny v místech 02 a 04. Staženiny se řadí do skupiny dutin (tj. vady třídy 400). Staženiny patří k nejčastěji vyskytujícím se slévárenským vadám, zejména proto, že vychází z fyzikální podstaty objemového smršťování při přechodu kovu z tekuté fáze do pevné krystalické fáze. Tomuto jevu nelze přímo zabránit, pouze technologicky ovlivnit místo výskytu staženiny. Vyskytují se uzavřené uvnitř odlitku v nenálitkovaných nebo nechlazených tepelných uzlech odlitku. Staženiny lze popsat jako dutiny nepravidelného tvaru, které zmenšují průřez součásti a tím jeho mechanické, zejména plastické vlastnosti. Jsou ostrohranné a působí vrubovým účinkem. Jejich povrch je většinou nezoxidovaný a jsou na něm viditelné dendrity. To je způsobeno podstatou jejich vzniku, kdy v tepelném uzlu při dendritické povaze tuhnutí kovu již nebyl dostatek tekutého kovu, který by do místa dosazoval [18].





Obr. 21 Staženina v místě označeném 02

Jak je možné vidět na obrázku č. 22, tak se v odlitku vyskytují i staženiny menších rozměrů. Tyto staženiny mají stejný charakter vzniku a jejich velikost je 1 – 3 mm. Vyskytují se v okolí větší staženiny v místě 04 a také v místě 03. Tyto staženiny menšího objemu rentgenová zkouška v místě 03 neodhalila. Detail pořízený ze stereolupy je na obrázku č. 22.



Obr. 22 Staženiny místě označeném 04



Po bližším analyzování části dutiny v místě označeném 01 se zjistilo, že část této dutiny nevykazuje typické znaky staženin popsané výše. Jak je zřetelně vidět na obrázku č. 23 není v tomto případě povrch ostrohranný, ale spíše hladký. Takový povrch je typický pro bubliny, které se také řadí do skupiny 400 – dutiny. Ty mají zcela odlišný mechanismus vzniku. Zatímco staženiny jsou spíše záležitostí dobře navržené technologie lití, bubliny jsou zejména problémem metalurgickým. Vznikají převážně během tuhnutí v důsledku snížení rozpustnosti plynů v kovu s klesající teplotou. Při překročení mezní rozpustnosti se plyny vyloučí v molekulární formě a vytvoří bubliny. U hliníkových slitin činí největší problémy především vodík. Jeho rozpustnost v tekutém hliníku je vysoká a významně roste s teplotou [18].

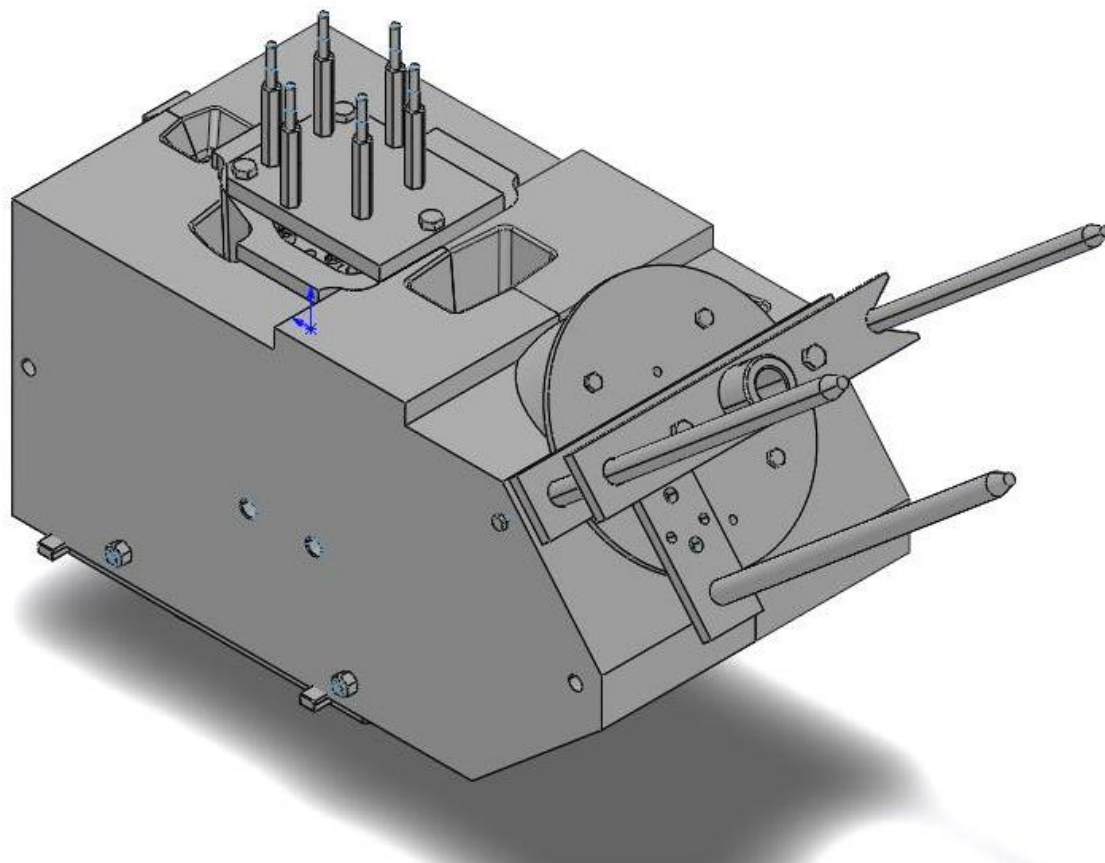
Jak je vidět na obrázku č. 23 nejedná se v tomto případě o bublinu typického oválného tvaru. Z tvaru dutiny lze usoudit, že v místě se během tuhnutí nejdříve začala formovat staženina, do které se poté difuzí dostal plyn. Není zde žádná možnost, jak určit o jaký plyn se jedná, nejpravděpodobnější je u hliníkové slitiny ovšem vodík. Ten se do taveniny může dostat z vlhkého náradí, vlhkého nátěru, špatným fungováním odvzdušňovacích otvorů chlazeného jádra nebo z jiné vlhkosti přítomné ve formě. Také může být problémem nedostatečného odplynění taveniny. Na obrázku č. 23 je zvýrazněné místo, které vykazuje spíše znaky staženiny. Do té pravděpodobně nadifundoval plyn a staženinu „nafouknul“. Kombinace těchto dvou slévarenských vad je u slitin hliníku poměrně častá.



Obr. 23 Kombinace staženiny a plynové vady v místě označeném 01

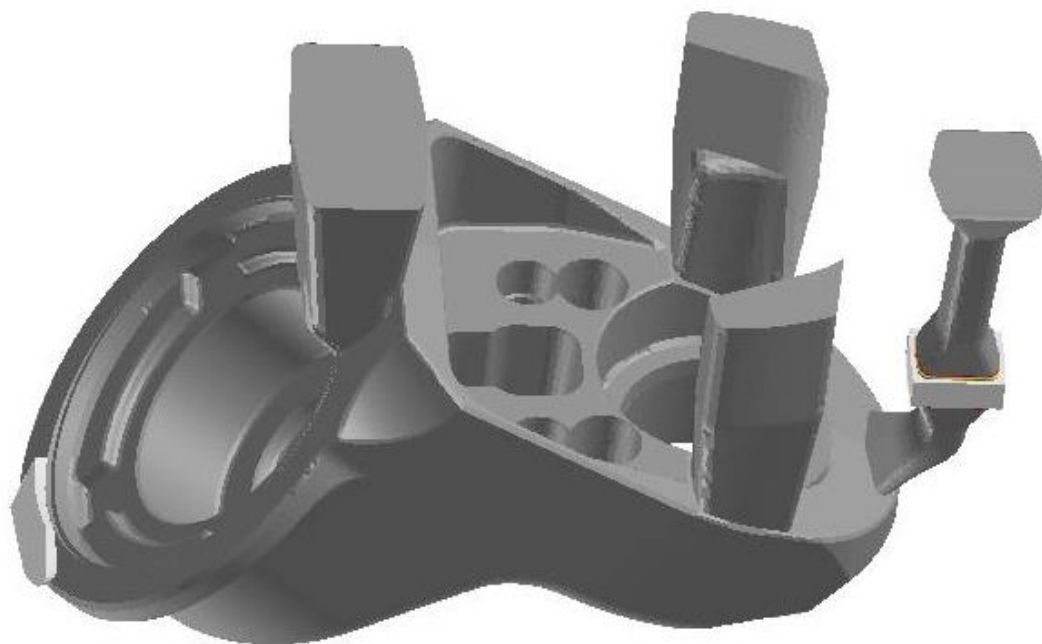
### 3.3 Geometrie

Pro zpracování numerické simulace plnění a tuhnutí byla slévárnou poskytnuta 3D data kokily používané k lití řešeného odlitku. Tato data byla dodána ve formátu IGES. Tento formát je vhodný pro import do běžně používaných softwarů pro 3D modelování (např. Solidworks). Rovněž jsou tato data vhodná pro import do simulačního programu ProCast. Úpravy importované geometrie kokily pro účely numerické simulace byly prováděny v modulu Visual-Mesh, který je součástí programového prostředí ProCast. Na obrázku č. 24 je zobrazen model kokily pro řešený odlitek.

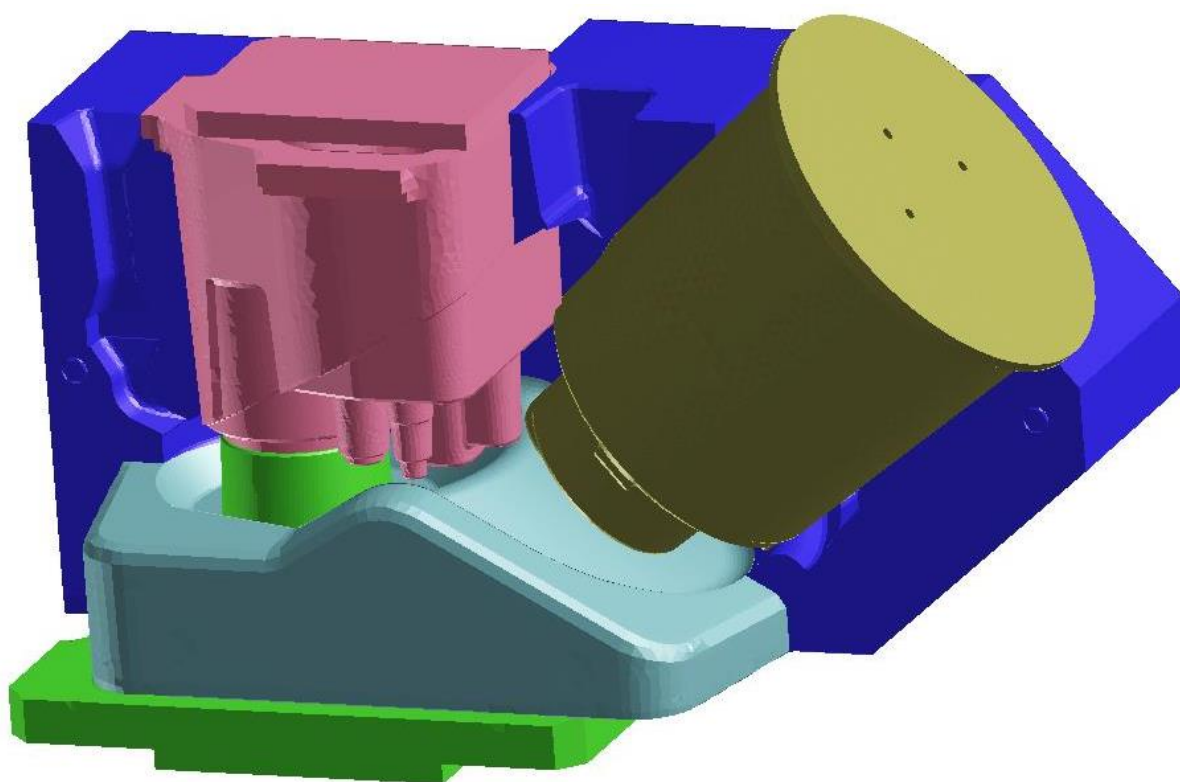


Obr. 24 Model kokily s jádry

Na obrázku č. 25 je model odlitku včetně nálitků a vtokové soustavy. Odlitek je nálitkován celkem ve třech místech. Hlavní náletek vprostřed odlitku bude dále nazýván jako středový náletek. Dva užší nálitky budou nazývány jako boční nálitky. Součástí vtokové soustavy je pěnový filtr. Na obrázku č. 25 je také na levé straně vidět zaslepení napojení druhého vtoku, který se nevyužívá (světlejší šedá barva). Na obrázku č. 26 je poté kokila i s jádry otevřená.



Obr. 25 Model odlitku s technologií



Obr. 26 Model otevřené kokily

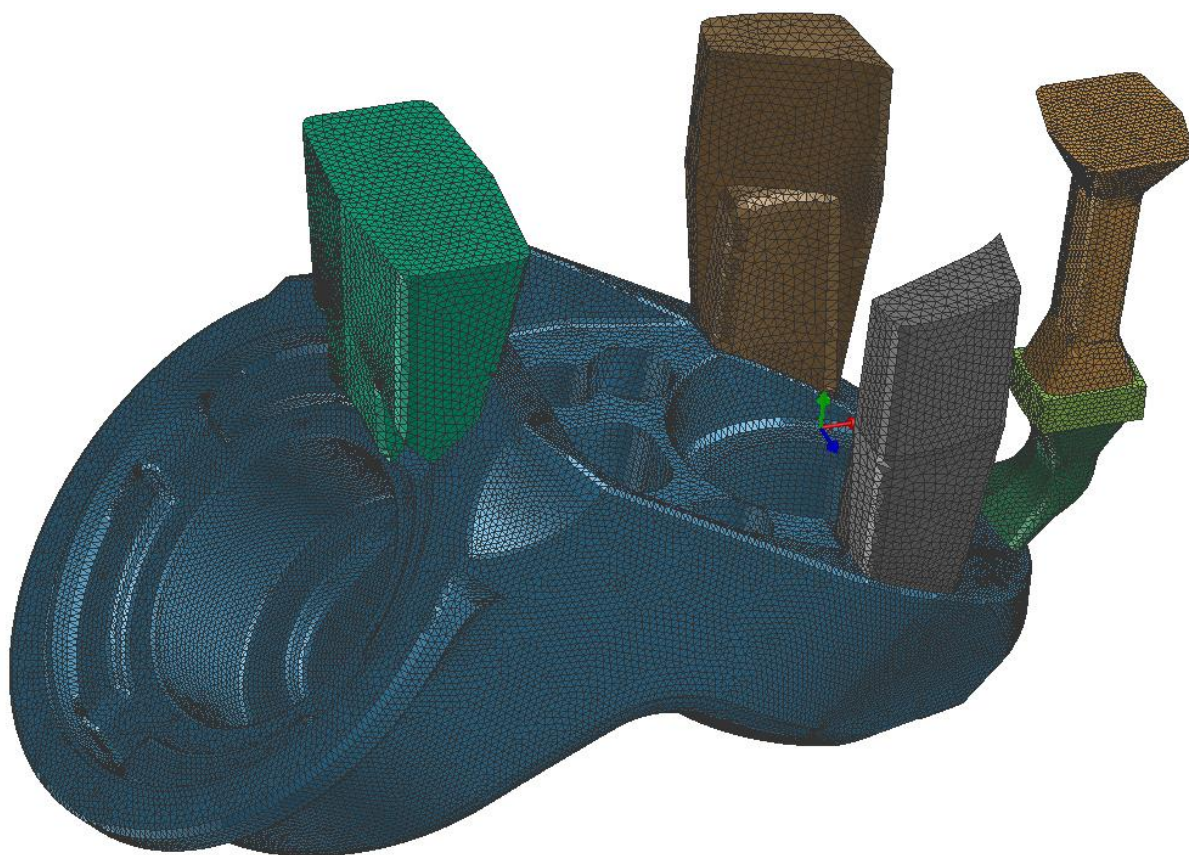


## 4 Numerická simulace vybraného odlitku

V úvodní teoretické části této diplomové práce byly spíše přehledově uvedeny dnešní možnosti numerických simulací. V této kapitole budou předvedeny možnosti simulačního programu ProCast v analýze plnění a tuhnutí, na řešeném odlitku, který byl rozebrán v předchozí kapitole. Celý proces zpracování numerické simulace lze rozdělit do tří kroků – preprocessing (tvorba geometrie a výpočtové sítě), mainprocessing (vlastní výpočet) a postprocessing (analýza výsledků simulačního výpočtu).

### 4.1 Preprocessing

Základem této fáze je vytvoření geometrických dat odlitku. Ta lze vytvořit přímo v prostředí simulačního programu, nebo importovat dodaná data ve vhodném formátu, jako bylo provedeno v případě této práce. Po provedení oprav geometrie a nadefinování ploch a objemů v prostředí Visual-Mesh byla vytvořena výpočtová síť. ProCast generuje síť variační metodou konečných prvků (FEM). Na obrázku č. 27 je vygenerovaná síť odlitku s nálitky a vtokovou soustavou. Stejným způsobem byla výpočtová síť vytvořena pro všechny části kokily a všechna jádra. Na jemnosti vygenerované sítě závisí přesnost výpočtu, ale také náročnost na operační paměť počítače a celková doba vlastního výpočtu. Dále jsou definována rozhraní, na kterých se stýká odlitek a kokila nebo odlitek a jádra. Na těchto rozhraních se realizuje přestup tepla z tuhnoucího odlitku do kovové formy.



Obr. 27 Vygenerovaná FEM síť pro numerickou simulaci

Kromě vygenerování sítě, na které bude probíhat vlastní výpočet, je nezbytné přiřadit jednotlivým objemům jejich materiál. Těmito objemy jsou myšleny jednotlivé části samotné kokily, jádra, odlitek a pěnový filtr. Také je definován izolační nátěr nálitků, který snižuje intenzitu přestupu tepla z tekutého kovu na rozhraní nálitku a kokily. Pro definici těchto parametrů byla využita databáze programu ProCast, která obsahuje odlévaný materiál AlSi12, běžné oceli používané pro kovové formy, pěnové filtry různých pórovitostí a nátěry různých vlastností.

Dále je potřeba nadefinovat počáteční a okrajové podmínky vstupující do numerického výpočtu. Jedná se o počáteční teploty jednotlivých objemů, místo vstupu taveniny do kokily, teplotu lití, rychlost lití, licí výška, odvod tepla z vnějšího povrchu kokily, atd. Podmínky lze v ProCastu zadávat na jednotlivé plochy, rozhraní a objemy, které byly definovány při tvorbě geometrie pro výpočet. Stanoví se, po jakých krocích, a jaká data, se mají při vlastním výpočtu ukládat na disk.

V kapitole 3.2.1 byla popsána technologie odlévání řešeného odlitku. V tabulce č. 3 jsou přehledně shrnuty slévárnou poskytnuté technologické parametry. Tyto informace nejsou ovšem dostatečné pro definici všech počátečních a okrajových podmínek. Některé parametry tedy musely být zvoleny. Volba parametrů z databáze programu ProCast byla provedena na základě odhadu po konzultaci se společností Mecas zabývající se numerickými simulacemi. Tyto vstupní parametry jsou shrnuty v tabulce č. 4. Na základě těchto parametrů bylo navrženo cyklování formy nezbytné pro další simulace kokilového lití.

Tab. 3 Technologické údaje poskytnuté slévárnou

Materiál odlitku	AlSi12
Surová hmotnost odlitku	36 kg
Materiál kokily a jader	Ocel
Filtrace kovu	Pěnový filtr
Nátěry nálitků	Izolační nátěr
Nátěry jader	Ano
Chlazení kokily	Pouze okolním vzduchem
Chlazení středového jádra	Hadicí vodou (blíže nespecifikováno)
Teplota lití	720°C
Předehřev kokily a jader	Plamenem přibližně na 300°C
Doba lití	18 s
Výrobní cyklus	4 kusy za hodinu



Tab. 4 Zvolené vstupní parametry do numerické simulace

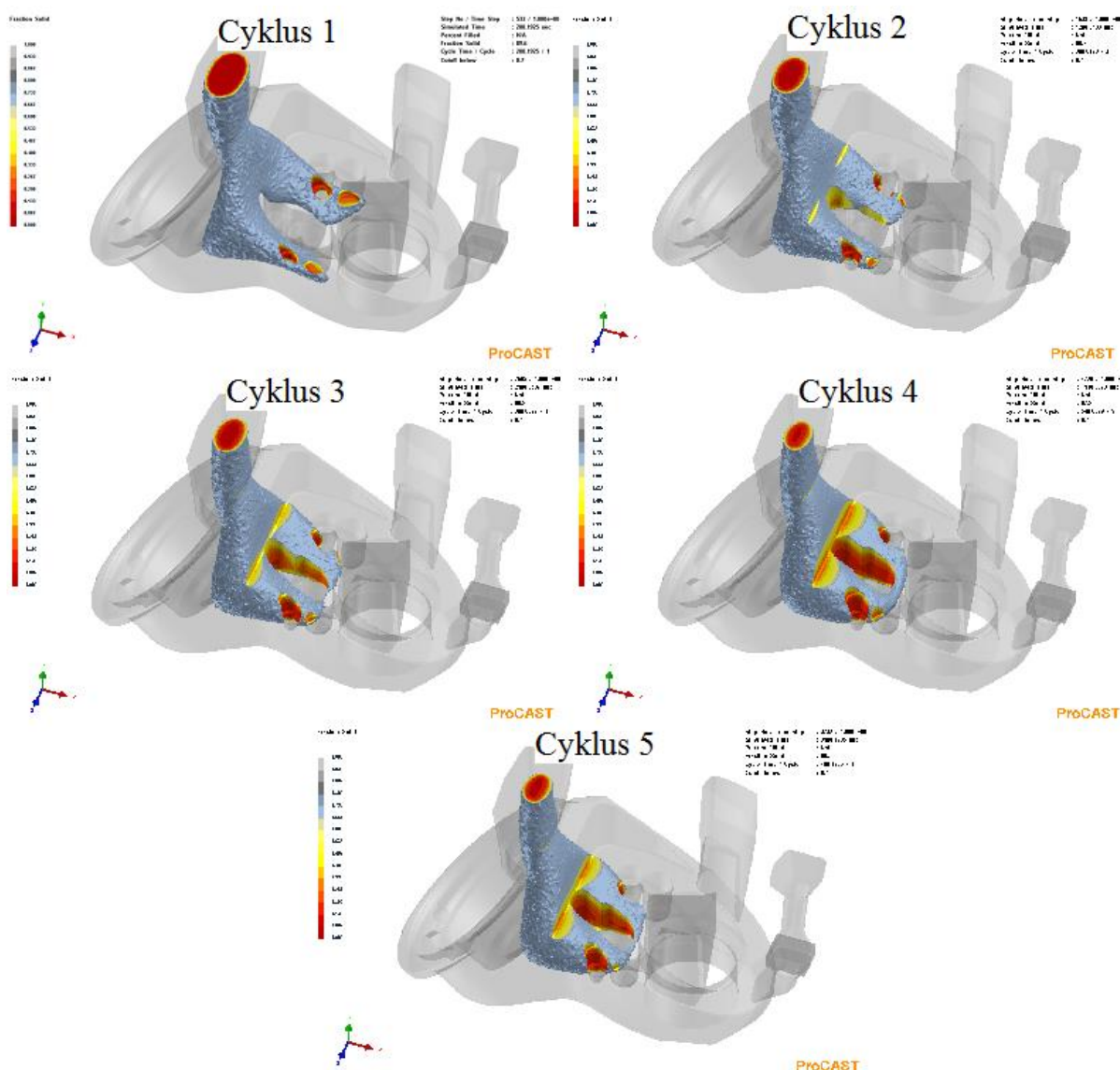
Materiál odlitku	AlSi12
Surová hmotnost odlitku	36 kg
Materiál kokily a jader	Ocel H11
Filtrace kovu	Pěnový filtr (Filter low)
Nátěry nálitků (simulovány snížením intenzity přestupu tepla na rozhraní)	$h = 1000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
Nátěry jader	Dycote 5 – tloušťka 0,8 mm
Chlazení kokily	Okolní vzduch – 30°C
Chlazení středového jádra	Zanedbáno (nelze specifikovat)
Teplota lití	720°C
Předehřev kokily a jader	300°C
Rychlost lití	317,5 m/s (tj. 18 s)
Licí průměr	30 mm
Koeficienty přestupu tepla na rozhraních	$h = 2000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
Výrobní cyklus pro výpočet nehomogenního rozložení teplot	
Počet provedených cyklů	5
Otevření formy	600 s (10. minuta)
Vyhození odlitku	720 s (12. minuta)
Ostřík	730 s → 735 s
Ofuk	736 s → 740 s
Uzavření formy	780 (13. minuta)
Konec cyklu (doba cyklu)	900 s (15. minuta)

## 4.2 Cyklování kokily

Při numerických simulacích odlévání do kovových forem je zásadním prvním krokem provést výpočet cyklování. Jedná pouze o simulaci tuhnutí v zadaném počtu cyklů. Během výrobního procesu prochází kokila tepelným cyklem, který má vliv na tuhnutí jednotlivých kusů odlitků a jejich výsledné vlastnosti. Cyklus použitý pro následné analýzy byl vypočten na základě zvolených vstupních parametrů (viz tabulka č. 4). Bylo provedeno celkem pět cyklů, po patnácti minutách. Vzhledem k tomu, že cyklus výroby není nijak zaveden do technologické karty a podle informací technologického úseku žádné chlazení ostříkem nebo ofukem formy mezi jednotlivými cykly neprobíhá, bylo toto chlazení ve vypočteném cyklu nastaveno na minimální hodnoty a časy. Výsledné nehomogenní rozložení teplot v kokile a jádrech po pěti cyklech bylo poté importováno jako počáteční podmínka rozložení teplot před litím pro následnou simulaci plnění a tuhnutí. Z důvodu kampaňovitého výroby tohoto odlitku, a také

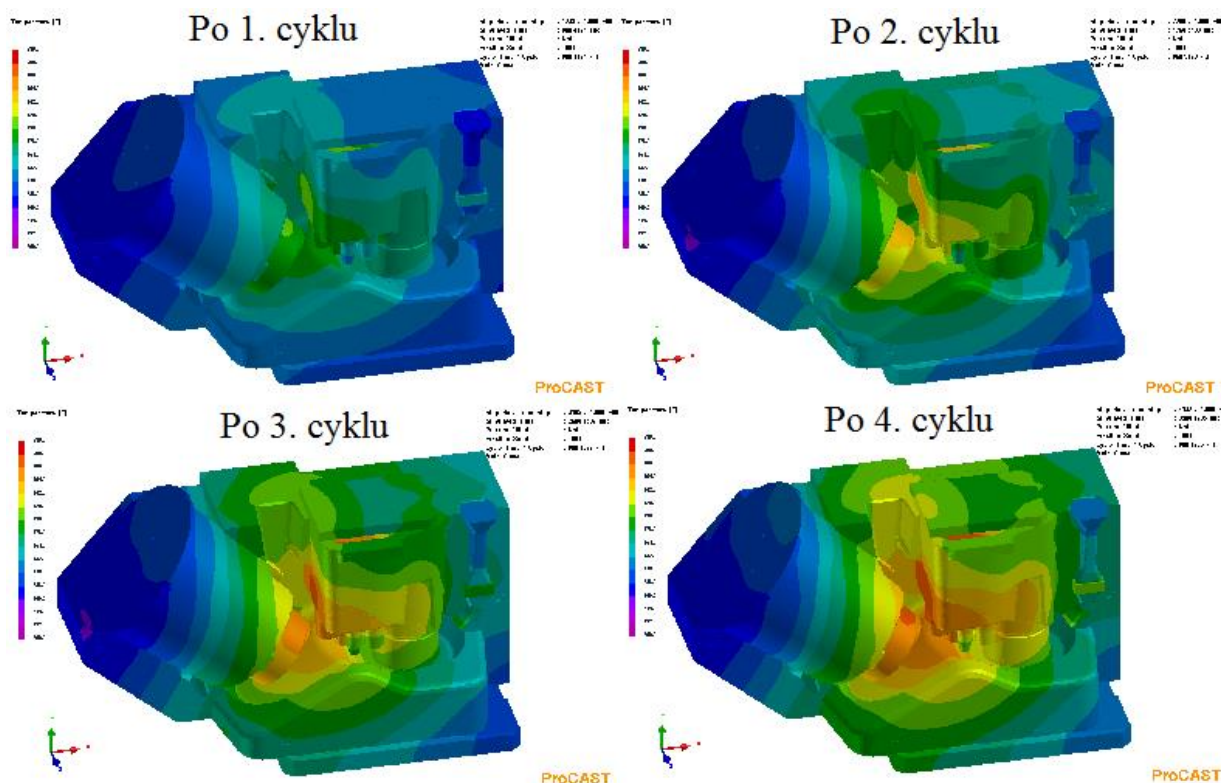
z časových důvodů, nebylo možné naplánovat experiment na změření a zkorigování teplot v průběhu výrobního cyklu.

Na obrázku č. 28 je zobrazen průběh tuhnutí v jednotlivých cyklech. Je vybrán okamžik, kdy fronta tuhnutí prochází kritickým místem kolem předléváných neprůchozích otvorů. První cyklus začíná litím do předeřháté formy. Počáteční teplota (předeřhrev) všech částí kokily a jader byla zvolena 300°C. Je zde zřetelně vidět, že v prvním cyklu je při průchodu fronty tuhnutí kolem výstupků na středovém jádru sklon k oddělení tekuté fáze při tuhnutí. Tato oddělená tekutá fáze pak může být příčinou slévárenské vady typu dutiny v oblasti pod neprůchozími předlévánými otvory. Již v druhém cyklu je zřetelné rozšíření fronty tekuté fáze v kritické oblasti. Jak se v dalších cyklech systém kokily postupně prohřívá, je sklon k oddělení čím dál menší. Ve čtvrtém a pátém cyklu již prochází fronta tuhnutí kolem kritických otvorů bez sklonu k oddělení tekutého kovu.

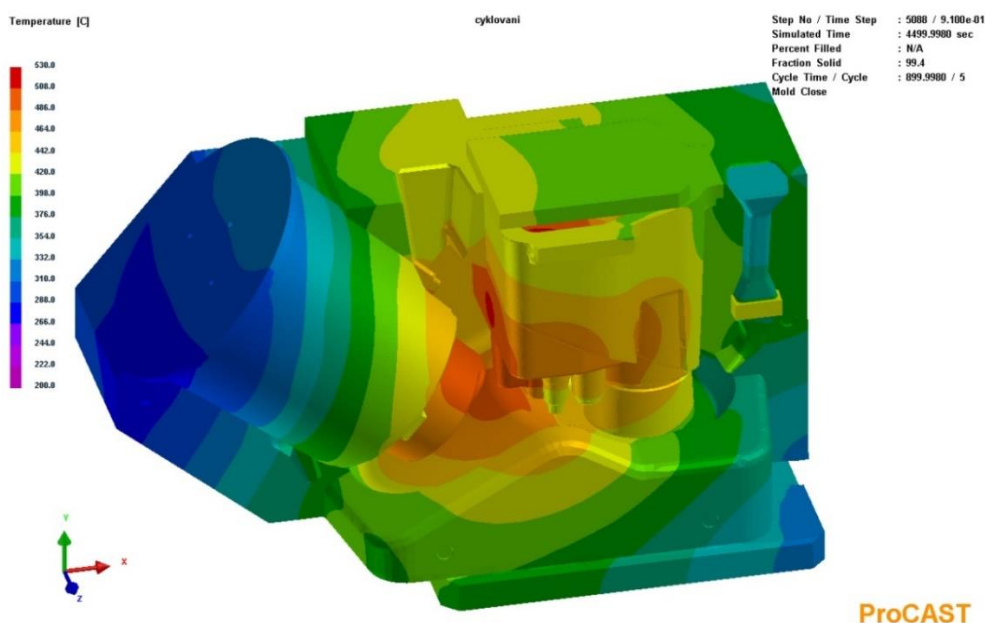


Obr. 28 Cyklování podle dodaných parametrů (viz tabulka č. 3)

Kromě porovnání postupu fronty tuhnutí v jednotlivých cyklech, je hlavním výsledkem simulace cyklování nehomogenní rozložení teplot v kokile a jádrech v jednotlivých cyklech. Na obrázku č. 29 je srovnání teplotních polí v průběhu výroby. Rozložení teplot po pátém cyklu (tedy před litím 6. kusu) je na obrázku č. 30. Tyto teploty byly importovány, jako počáteční, pro simulace plnění a tuhnutí rozebírané v následujících podkapitolách.

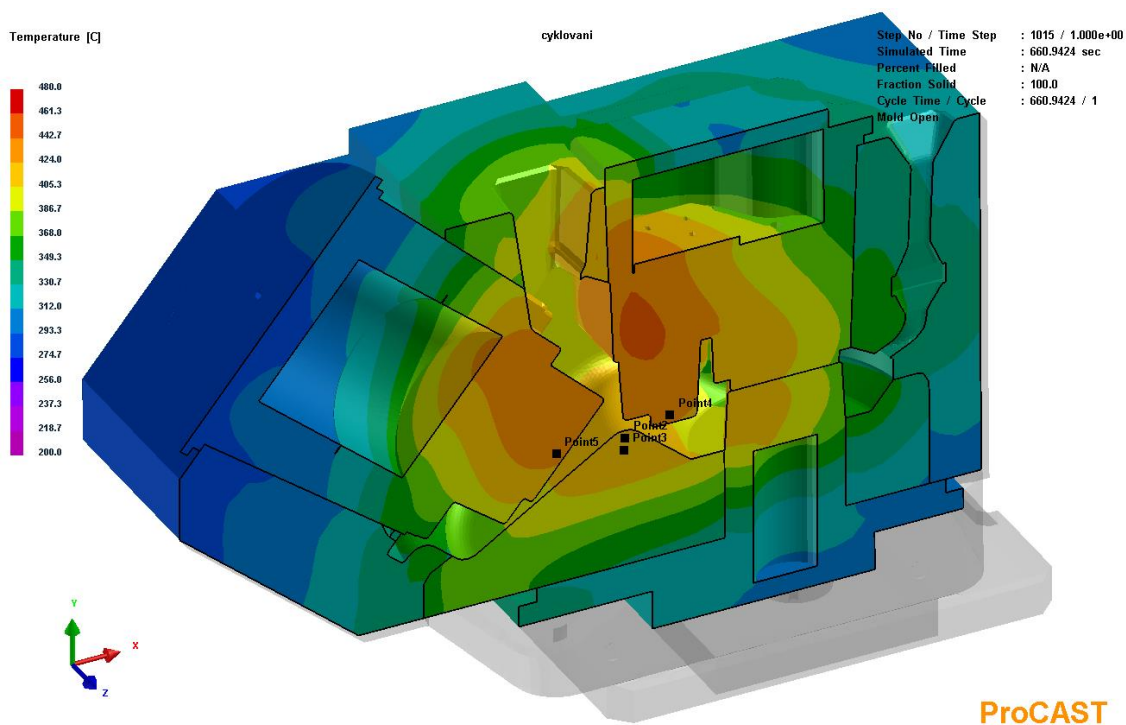


Obr. 29 Rozložení teplotního pole ve výrobním cyklu (stupnice 200 – 530°C)

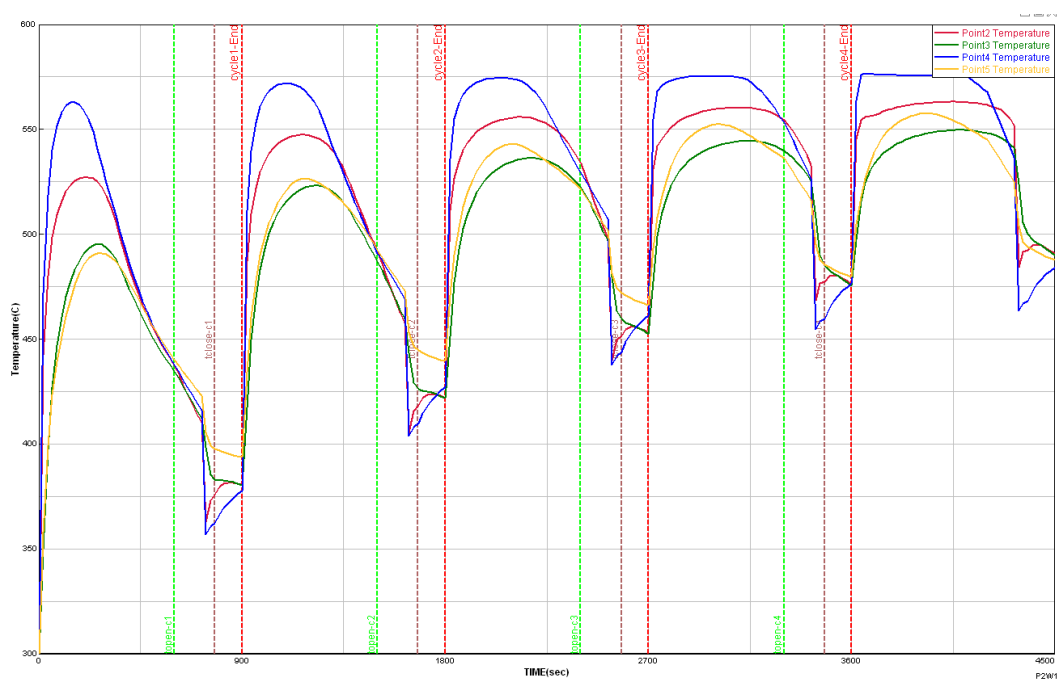


Obr. 30 Výsledné rozložení teplot po pátém cyklu (stupnice 200 – 530°C)

Vhodným nástrojem simulačního softwaru je umístění virtuálních termočlánků do zvolených míst kokily nebo jader. Výstupem jsou křivky teplot ve zvolených bodech v průběhu celého tepelného cyklu. Umístění bodů je na obrázku č. 31 a křivky průběhu teplot na obrázku č. 32. Je viditelné, že postupně se tepelný cyklus ustaluje. Po pátém cyklu by již kokila pracovala s ustáleným tepelným cyklem. Z toho důvodu je pět vypočítaných cyklů dostačujících.



Obr. 31 Zvolené body pro vykreslení křivek průběhu teplot



Obr. 32 Křivky teplot během výrobního cyklu v daných bodech

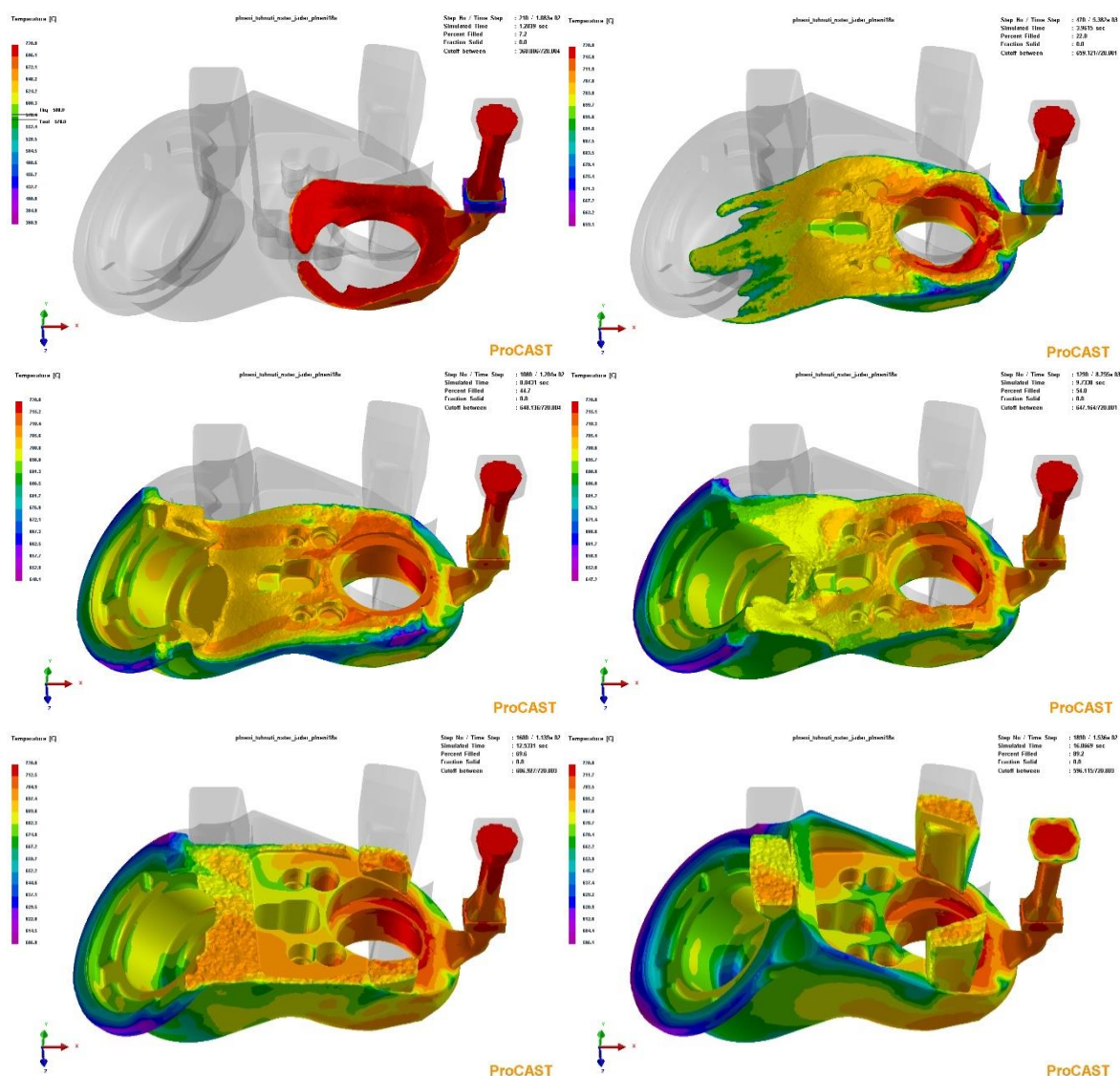


### 4.3 Analýza plnění

Teplotní pole vypočtené v simulaci cyklování je definicí počátečního rozložení teplot v jednotlivých objemech modelu pro výpočty plnění a tuhnutí. Po dokončení mainprocessingu, kdy probíhá samotný numerický výpočet, následuje fáze postprocessing, kde si uživatel zobrazí výsledky numerické simulace a provádí jejich analýzu. V následujících podkapitolách budou na řešeném odlitku demonstrována využívaná zobrazení výsledků. Prvním typem zobrazených vypočtených dat je průběh plnění formy tekutým kovem.

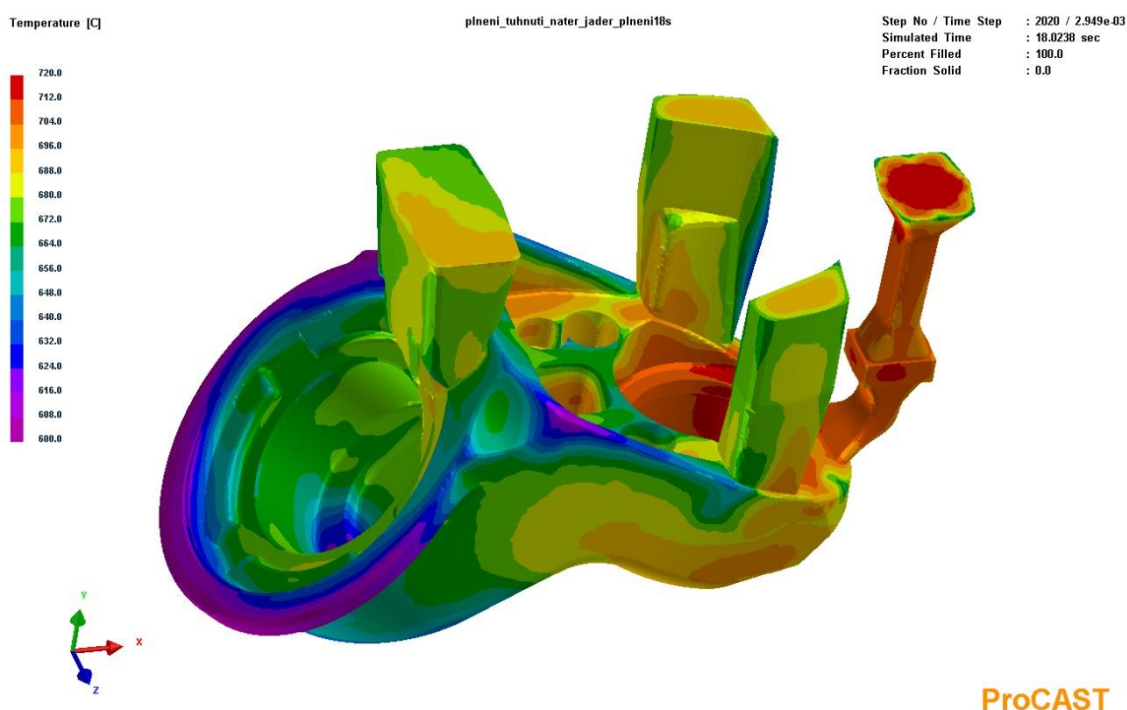
#### 4.3.1 Rozložení teplot

Na obrázku č. 33 je zobrazeno rozložení teplot během plnění kokily tekutým kovem. Průběh plnění lze považovat za klidný. Nepředpokládá se, že by způsob plnění byl příčinou řešených vad. Nejvýraznější pohyb hladiny nastane při naplnění části kolem šikmého jádra, kdy se vytvoří vlna, která na chvíli rozpohybuje jinak klidnou hladinu tekutého kovu plnicího kokilu.



Obr. 33 Rozložení teplot při plnění (stupnice – „Current State“)

Teplota při plnění formy je zobrazena prostřednictvím barev. Na stupnici teplot je důležité nastavit vhodné rozsahy teplot. V případě obrázku č. 33 bylo využito zobrazení „Current State“, kdy je rozsah stupnice teplot určen maximální a minimální teplotou v daném okamžiku. Druhým způsobem je pak nastavení pevného rozsahu stupnice. V průběhu plnění je kromě stupnice teplot zobrazen čas od počátku plnění, procento zaplnění formy v daném okamžiku a procento frakce solidu. Procento frakce solidu umožňuje ověřit, zda tuhnou některé části již v průběhu plnění kokily, což může vést například ke vzniku studených spojů. Na obrázku č. 34 je celkové rozložení teplot v okamžiku 100 % naplněné kokily (čas 18 sekund). Procento frakce solidu je v tomto okamžiku nula. Při plnění tohoto odlitku tedy není sklon ke vzniku studených spojů, nedolití a jiných vad souvisejících s rozložením teplot v průběhu plnění. Rozsah stupnice je 600°C až 720°C, softwarem uvažovaná teplota solidu slitiny je 570°C a teplota likvidu 580°C.

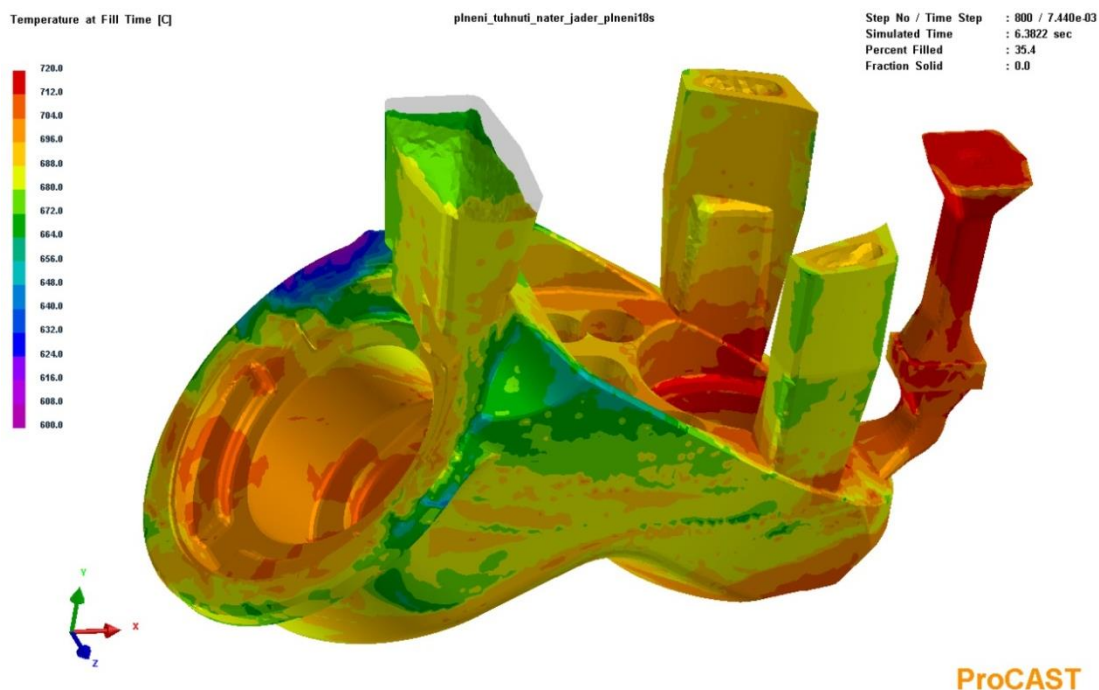


Obr. 34 Rozložení teplot po naplnění (stupnice – 600°C až 720°C)

Na obrázku č. 34 je vidět rozložení teplot, kdy nejvyšší teplotu má část odlitku v blízkosti vtokové soustavy. Naopak nejintenzivněji klesá teplota u kruhové části kolem šikmého jádra. V tomto místě se nachází druhý vtok, který je zaslepený a pro plnění kokily se nevyužívá. Lze usoudit, že tento vtok by neměl výrazný kladný vliv na plnění, jelikož by prohříval část odlitku, která se začíná při aktuálním způsobu plnění usměrněně ochlazovat od stěny směrem do nálitkového tepelného uzlu.

Dalším vhodným zobrazením rozložení teplot je teplota v době naplnění („Temperature at Fill Time“). Zobrazuje, jakou teplotu měl tekutý kov v okamžiku, když zaplnil daný objem v odlitku. Lze tak určit, jakou teplotu měl kov v době, kdy zaplnil nálitky, což je důležité pro jejich funkci. Například u extermických nálitků je daná minimální teplota kovu pro

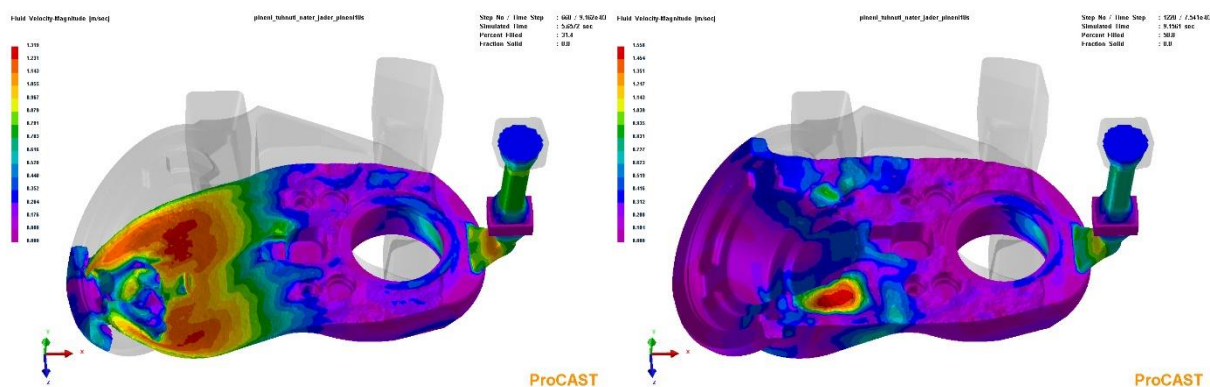
odstartování chemické reakce, která dále ohřívá kov v nálitku. Na obrázku č. 35 je tohle rozložení teplot zobrazeno. Nejnižší teplota kovu při zaplnění určitého objemu v odlitku byla přibližně 600°C. S ohledem na to, že teplota solidu je 570°C je toto zobrazení teplot potvrzením, že v odlitku nehrozí vady spojené s tuhnutím kovu již při plnění.



Obr. 35 Teplota kovu v okamžiku zaplnění daného objemu (stupnice 600°C až 720°C)

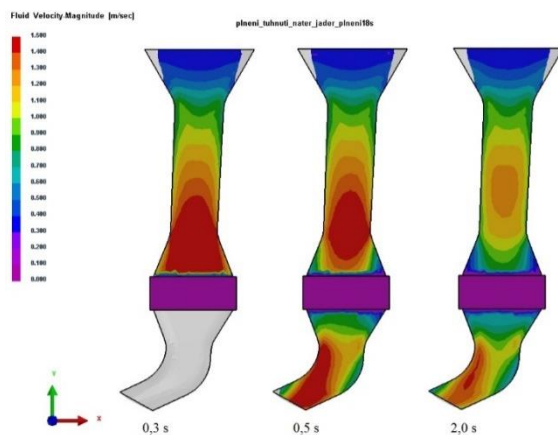
#### 4.3.2 Rychlost proudění tekutého kovu

Kromě rozložení teplot, je důležitou charakteristikou rychlost plnění. Stupnice je nastavená v jednotkách metr za sekundu. Na obrázku č. 36 je vidět, že se při plnění objevují oblasti, kde je rychlost tekutého kovu vyšší (přibližně 1,5 m/s). Tyto oblasti se objevují pouze na krátký čas například při zmiňovaném rozvlnění hladiny. Například u pískových forem je za kritickou rychlost považována hodnota 0,5 m/s. Nicméně pro kokily je tato hodnota vyšší a při plnění řešeného odlitku se nepředpokládají problémy způsobené vysokou rychlostí proudění kovu.



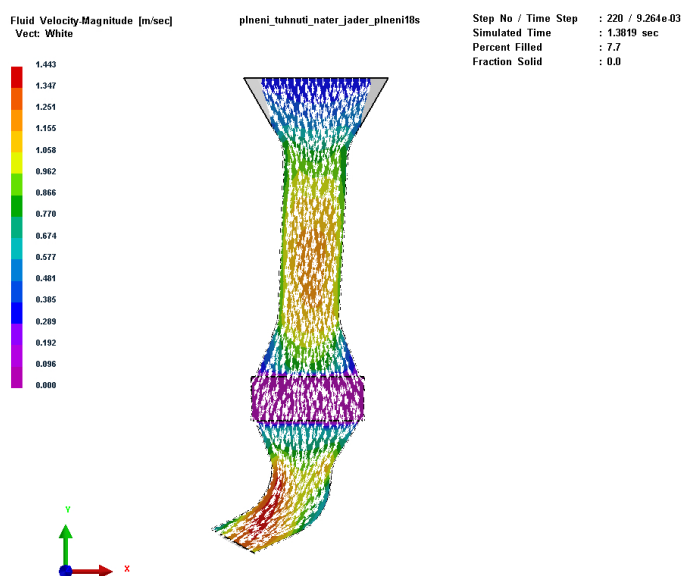
Obr. 36 Zobrazení rychlostí při plnění kokily (stupnice 0 m/s až 1,5 m/s)

Často analyzovanou oblastí z hlediska rychlosti plnění jsou vtokové soustavy. V případě řešeného odlitku se jedná o nekomplikovanou vtokovou soustavu. Na obrázku č. 37 je zobrazení rychlosti proudění tekutého kovu vtokovou soustavou ve vybraných časech po zahájení plnění. Zde je vhodné využít možnosti softwaru zobrazit výsledky numerické simulace v řezu součástí. Rychlost proudění kovu ve vtokové soustavě je regulována průtočností pěnového filtru. Po počátečním rázu se po přibližně dvou sekundách rychlost tekutého kovu stabilizuje a po zbytek plnění se její charakter nemění.



Obr. 37 Zobrazení rychlosti proudění kovu v řezu vtokovou soustavou (stupnice – 0 m/s až 1,5 m/s)

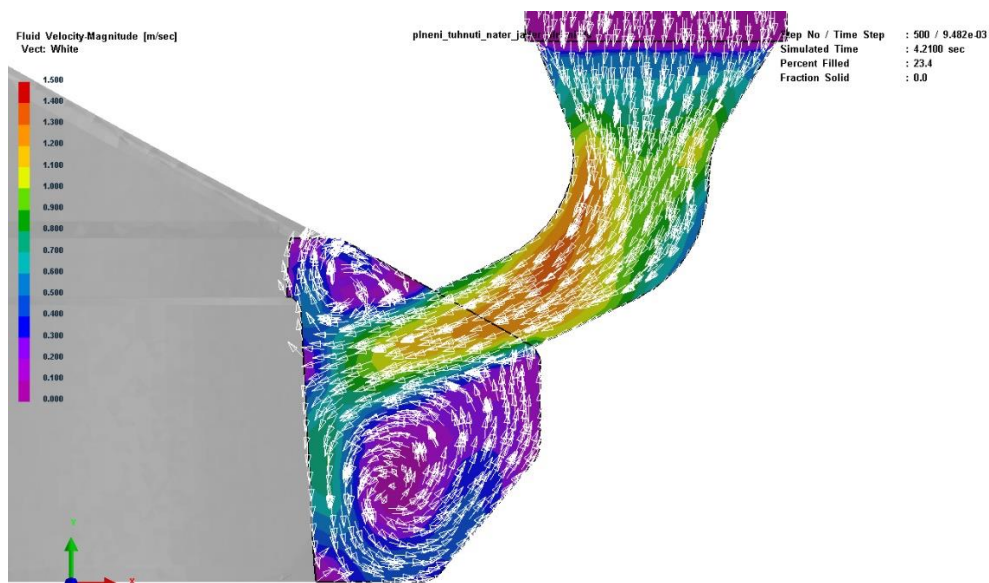
Rychlost proudění ve vtokové soustavě výrazně nepřesahuje hodnotu 1 m/s. Lze tedy považovat vtokovou soustavu za vhodně navrženou. Ve složitých vtokových soustavách mohou dále nastávat problémy s nadměrným vířením kovu, což může být příčinou tvorby oxidických vměstků, sekundární strusky a jiných slévárenských vad. Zde je vhodné zvolit zobrazení vektorů rychlosti proudění (viz obrázek č. 38). Pro svou jednoduchost je vtoková soustava řešeného odlitku, co se týče turbulencí kovu, bezproblémová.



Obr. 38 Vektory rychlosti proudění v řezu vtokové soustavy

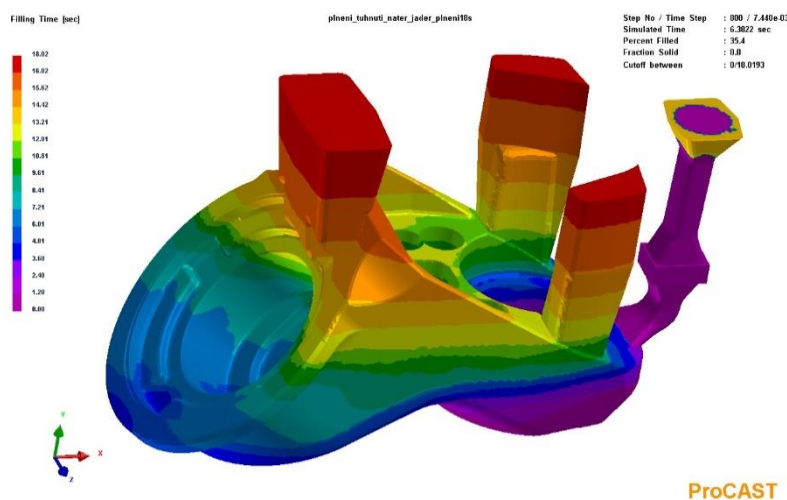


Další problematika, kterou je vhodné analyzovat zobrazením vektorů rychlosti proudění, je víření kovu vznikající v plnicím se odlitku. To může mít ve slitinách hliníku podobně jako víření ve vtokové soustavě negativní vliv na vznik oxidů. Mimo to nadměrné turbulence kovu mohou poškozovat formu, což platí zejména u lití do pískových forem, ale také například u tlakového lití do kovových forem. Na obrázku č. 39 je prostřednictvím vektorů zobrazeno víření v oblasti výstupu tekutého kovu z vtokové soustavy. Je způsobeno tím, že vtoková soustava je do odlitku zaústěna přímo proti jádru umístěnému ve spodní desce. Mimo jiné může takovéto zaústění být příčinou vady eroze formy. Náchylnější na vznik této vady by bylo opět pískové jádro. V případě kovového jádra je náchylnost k jeho erozi minimální.



Obr. 39 Víření v oblasti zaústění vtokové soustavy

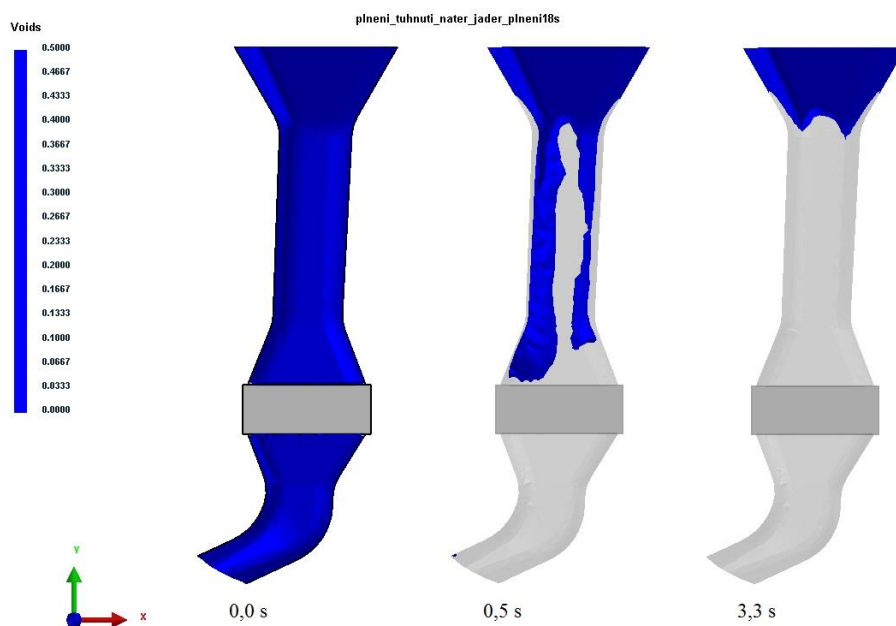
S rychlostí plnění souvisí také zobrazení doby zaplnění jednotlivých částí kokily, zobrazené na obrázku č. 40. Lze tak určit, jak dlouho po zahájení plnění se tekutý kov dostal do jednotlivých částí kokily.



Obr. 40 Doba zaplnění jednotlivých částí (stupnice 0 až 18 sekund)

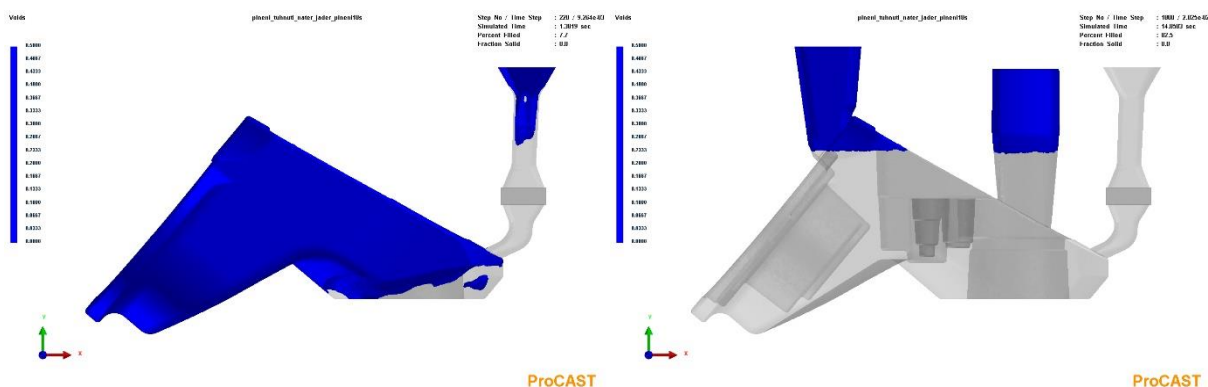
### 4.3.3 Vzduch při plnění

Některé vtokové soustavy mohou být náchylné na strhávání vzduchu proudícím tekutým kovem do odlitku. To může mít za následek tvorbu oxidů, bublin nebo uzavřeného vzduchu v odlitku. Na obrázku č. 41 je zobrazena přítomnost vzduchu ve vtokové soustavě během plnění. Na začátku je celý objem vtokové soustavy vyplněn vzduchem. Poté nějakou dobu trvá, než tekutý kov vzduch zcela vytlačí. Po přibližně třech sekundách je vtoková soustava zcela zaplněna kovem a lze konstatovat, že není náchylná na strhávání vzduchu do odlitku.



Obr. 41 Vzduch ve vtokové soustavě

Vzduch při plnění kokily nečiní problém pouze ve vtokové soustavě. Je vhodné také analyzovat, zda nedochází během plnění k uzavírání vzduchu v odlitku. Na obrázku č. 42 lze vidět, že v oblasti, kde u zaústění vtokové soustavy dochází k víření, se na okamžik uzavře malý objem vzduchu. Ke konci plnění ovšem v odlitku žádný uzavřený vzduch nezůstává. Taktéž na rozřezaném odlitku nebyly objeveny žádné objemy uzavřeného vzduchu. Tato funkce je více využívaná u tlakového lití, kde jsou problémy s uzavřeným vzduchem častější.



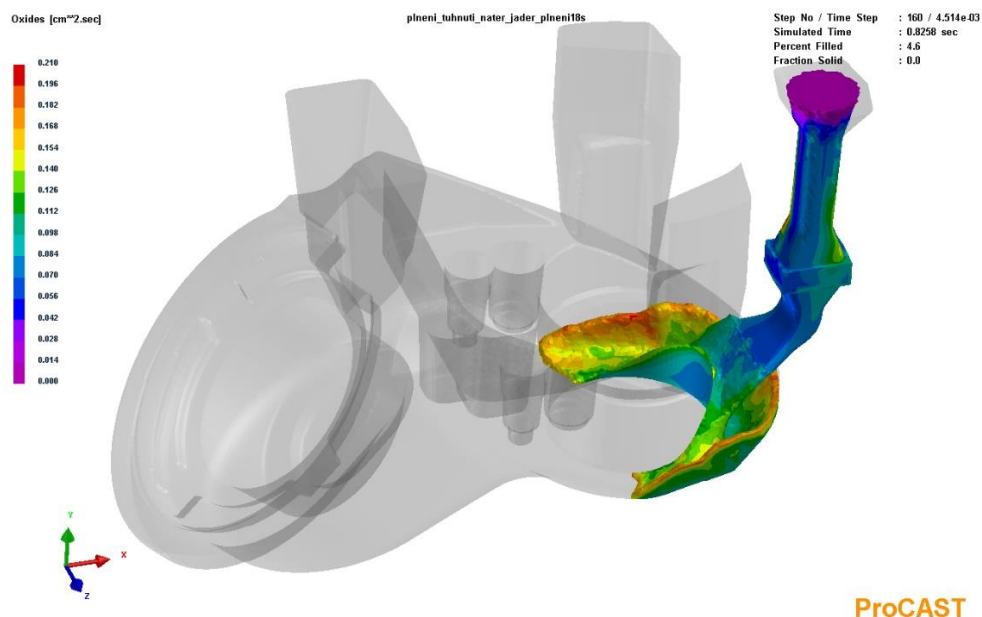
Obr. 42 Zobrazení vzduchu v průběhu plnění

#### 4.3.4 Vznik oxidů ve slitinách hliníku

Reoxidační procesy, které probíhají během odlévání a plnění formy, jsou častým jevem téměř u všech slitin. Hliníkové slitiny, zejména kvůli velké afinitě hliníku ke kyslíku, vytváří na povrchu taveniny oxidické blány v přítomnosti atmosféry téměř okamžitě (už po cca 0,01 sekundách působení atmosféry). Pokud je v dutině slévárenské formy povrch taveniny vystaven delšímu působení atmosféry, oxidická blána hrubne. V případě, že dojde k turbulentnímu proudění tekutého kovu, může být blána stržena proudem kovu a transportována dále do odlitku, kde poté zůstane. Oxidické blány mohou také způsobit problémy při vstupu taveniny z širších průřezů do užších [19].

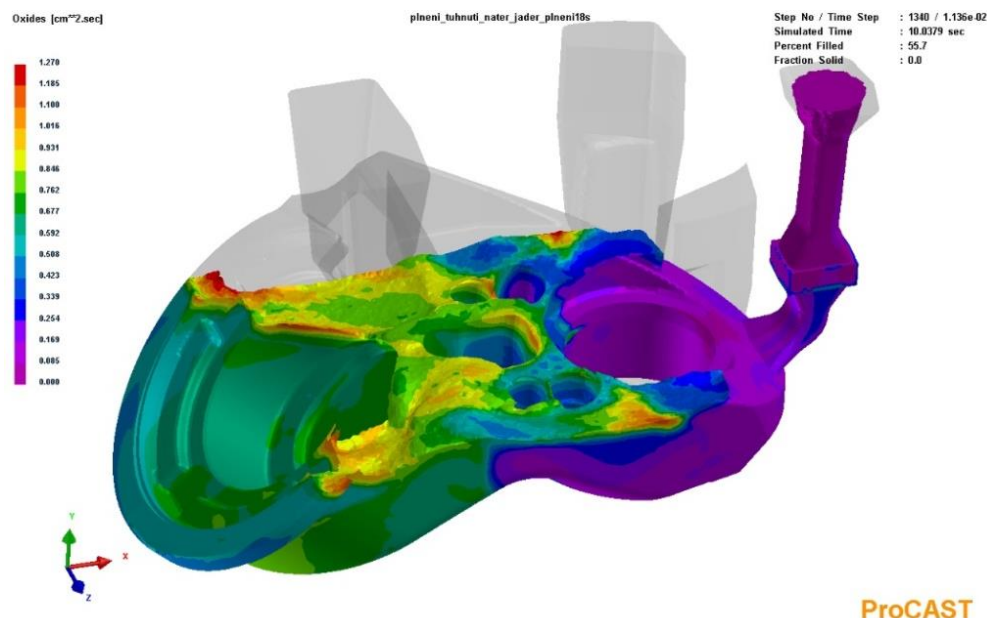
Co se týče mechanických vlastností, působí oxidické blány velmi negativně. Mají často ostré konce a mohou být koncentrátoři napětí, na kterých bude docházet k iniciaci lomu. Dále činí problémy u hliníkových odlitků s požadavky na propustnost. Tlakové médium může pronikat mezi oxidickou blánou a okolním materiálem. Mimo to tvoří zárodky pro vznik dalších slévárenských vad (např. ředin). Proto má smysl se zabývat vhodným návrhem vtokové soustavy, za účelem omezení turbulencí jako příčiny stržení oxidických blan do odlitku.

V prostředí slévárenského simulačního programu ProCAST slouží pro sledování reoxidačních dějů funkce „Oxides“. Tato funkce umožňuje v reálném čase sledovat volný povrch taveniny, jenž je v dutině slévárenské formy vystaven působení atmosféry. Funkce sleduje povrch vystavený atmosféře po celou dobu plnění, i v okamžiku kdy je stržen do objemu odlitku turbulencí tekutého kovu. Funkce taktéž počítá s časem, po který je volný povrch vystaven atmosféře. Množství oxidů na volném povrchu je v ProCastu vizualizováno jako jejich plocha násobená časem. Čím vyšší je pak hodnota funkce (v jednotkách  $\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ ), tím vyšší je pravděpodobnost, že v těchto místech budou přítomny oxidické blány. Tento údaj neurčuje přesné množství oxidických blán, ale určí místa v tavenině, která byla nejdelší dobu vystavena působení atmosféry v dutině formy [19], [20].



Obr. 43 Hodnoty funkce „Oxides“ na počátku plnění (stupnice 0 až  $0,2 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}$ )

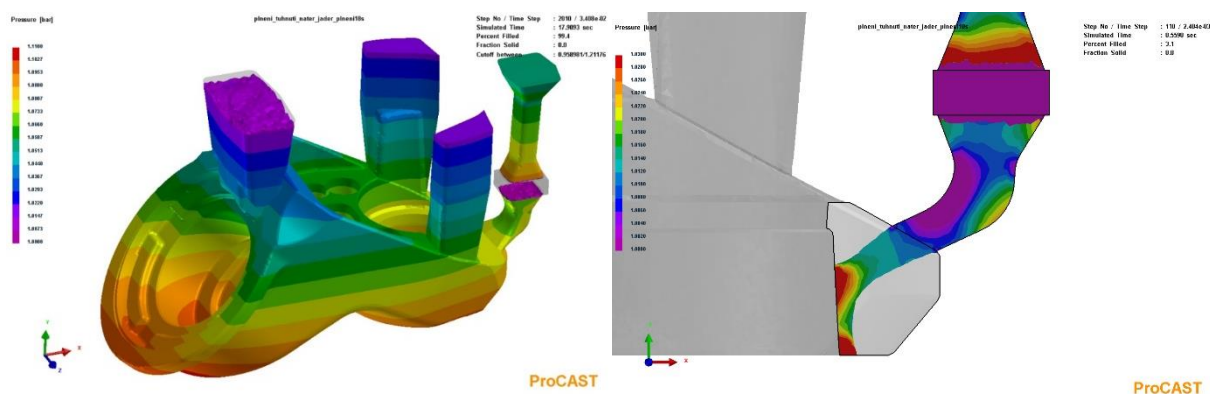
Na obrázku č. 43 je zobrazena funkce „Oxides“ na počátku plnění kokily. Hodnoty funkce jsou minimální. Na obrázku č. 44 je potom funkce zobrazena při dříve zmiňovaném rozvlnění hladiny kovu. Hodnoty jsou v určitých místech zvýšené. Celkově jsou hodnoty funkce „Oxides“ na hladině vyšší, protože byla delší doba vystavena působení atmosféry. Vtoková soustava řešeného odlitku je z hlediska tvorby oxidů dobře navržena.



Obr. 44 Hodnoty funkce „Oxides“ při rozvlnění hladiny (stupnice 0 až  $1,3 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}$ )

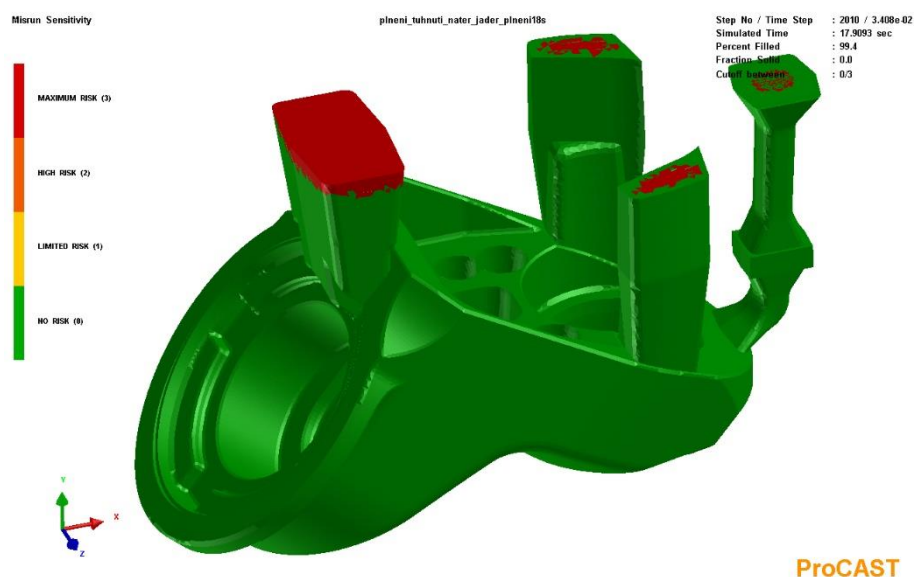
#### 4.3.5 Další možnosti v analýze plnění

Dále je v možnostech simulačního softwaru zobrazení tlaku v jednotlivých částech odlitku. Tlak, kterým působí tekutý kov na formu, může být zásadní spíše u pískových forem, kde je omezená vaznost formovací směsi. Na obrázku č. 45 vlevo je rozložení tlaků v odlitku zcela zaplněném tekutým kovem. Stupnice je v jednotkách bar. Na stejném obrázku vpravo je charakter rozložení tlaku v tekutém kovu dopadajícím na spodní jádro.



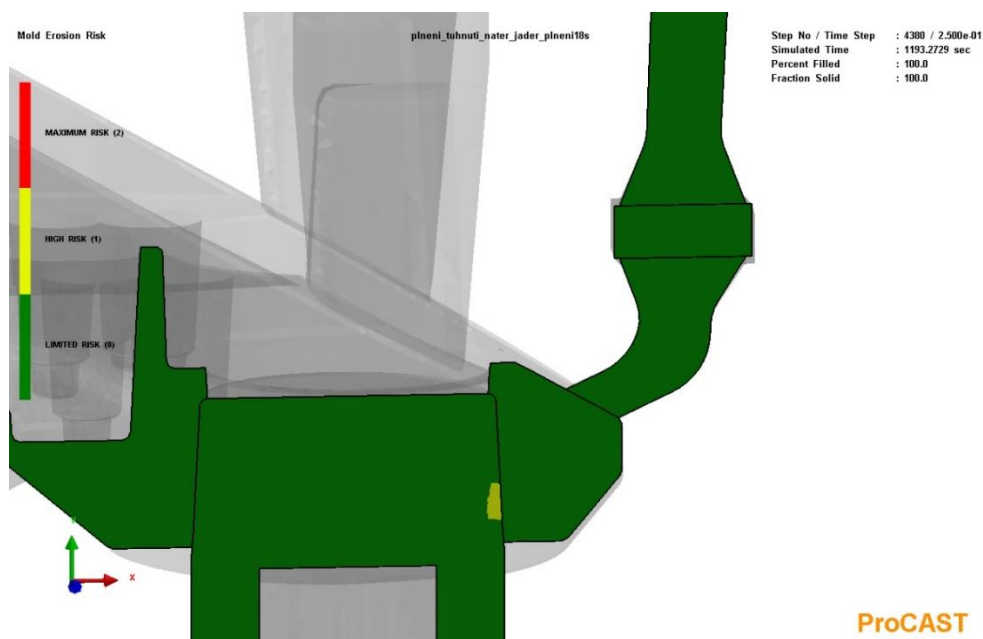
Obr. 45 Rozložení tlaku:  
 tekutého kovu v zcela zaplněné kokile (stupnice 1 až 1,11 bar) – vlevo,  
 tekutého kovu dopadajícího na jádro (stupnice 1 až 1,03 bar) – vpravo

ProCAST obsahuje například funkci „Misrun sensitivity“, která vyjadřuje sklon k nezaběhnutí. Na obrázku č. 46 je tato funkce zobrazena. V řešeném odlitku nejsou místa, kde by byl sklon k nezaběhnutí kovu. Tato funkce nachází uplatnění spíše u tenkostěnných odlitků.



Obr. 46 Sklon k nezaběhnutí

Podobná funkce existuje pro určení míst formy, kde je sklon k její erozi. Tato funkce se nazývá „Mold erosion risk“ a je zobrazena na obrázku č. 47. Výchozí vstupní údaje pro zobrazení míst formy se sklonem k erozi jsou kritická rychlost a kritický čas. Pro příklad u řešeného odlitku po definování kritické rychlosti 1 m/s a času 10 sekund funkce zobrazí místo dopadu tekutého kovu na jádro ve spodní desce. Nutno dodat, že při reálných kritických hodnotách by u kovového jádra při gravitačním lití sklon k jeho erozi predikován nebyl.



Obr. 47 Sklon k erozi jádra

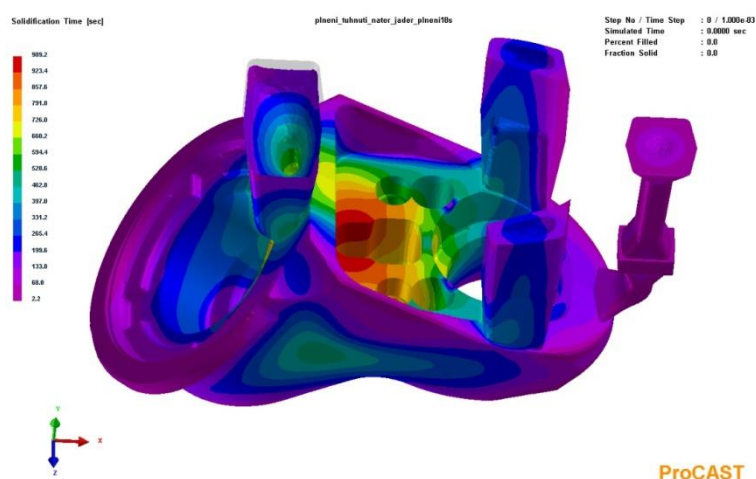


## 4.4 Analýza tuhnutí

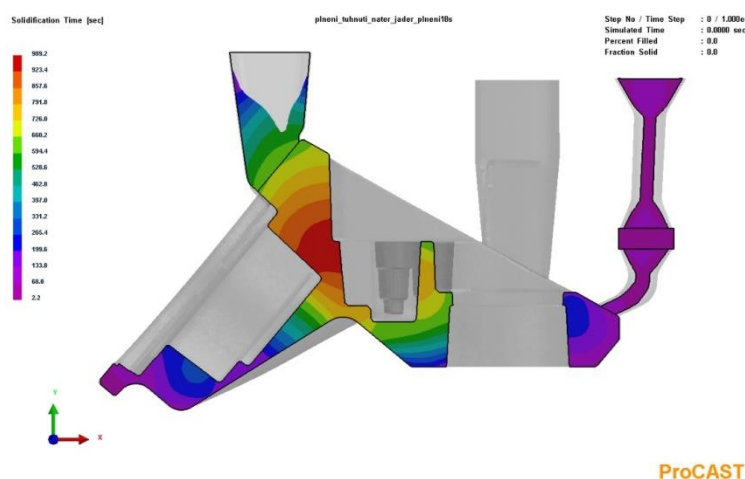
Druhou oblastí analýzy výsledků numerické simulace je rozbor fáze tuhnutí odlitku. Při analýze fáze plnění je možno predikovat vady typu nezaběhnutí, nedolití, vznik studených spojů, vznik oxidů a podobně. Ve fázi tuhnutí jsou to především vady spojené s fyzikálním jevem zmenšování objemu kovu s klesající teplotou. Mohou to být především staženiny, které byly identifikovány u řešeného odlitku. Dále například špatná funkce nálitků a podobně.

### 4.4.1 Doba tuhnutí

Výsledky numerické simulace fáze tuhnutí lze zobrazit jako čas, ve který ztuhly jednotlivé části odlitku. Toto zobrazení je na obrázku č. 48. Odlitek tuhne od stěn usměrněně do jeho středu. Soustředěné staženiny vznikají v odlitcích v místě tepelného uzlu, neboli nahromadění materiálu. V tomto místě tuhne kov jako poslední a z důvodu zmenšování jeho objemu zde dochází ke vzniku staženiny. Polohu tepelného uzlu v řešeném odlitku lze dobře vidět na obrázku č. 49. Evidentně zůstává v nahromadění materiálu vedle středového jádra.



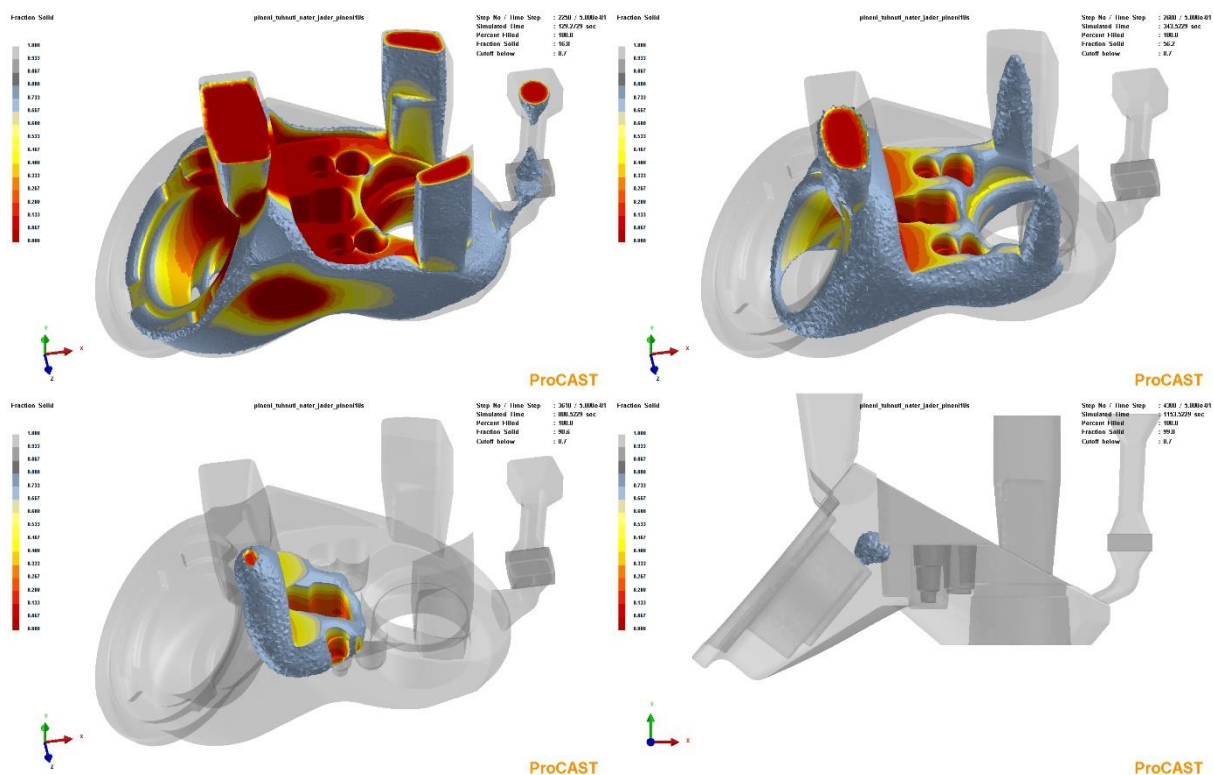
Obr. 48 Doba tuhnutí



Obr. 49 Tepelný uzel (doba tuhnutí zobrazená v řezu)

#### 4.4.2 Frakce solidu

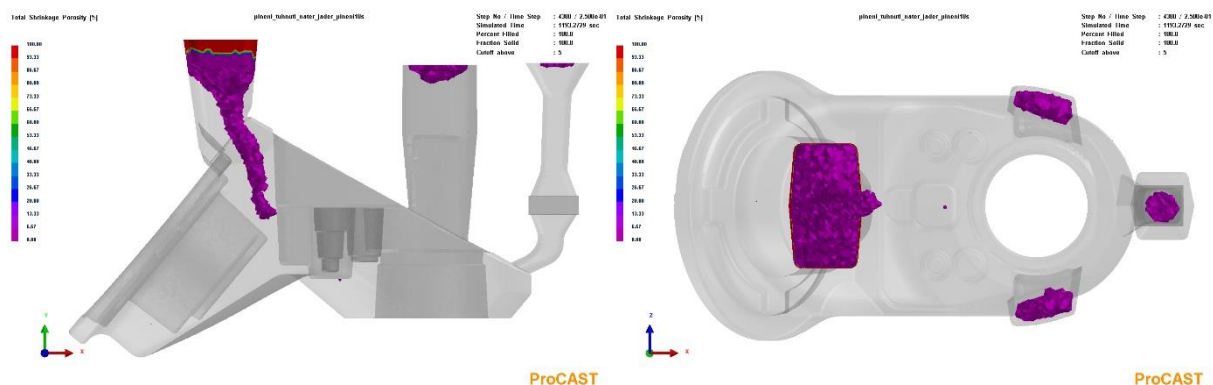
Názornější pro analýzu tuhnutí je zobrazení frakce solidu. Nejvýhodnější je použít zobrazení „Cut off“ (kritická hodnota frakce solidu u této slitiny byla uvažována 0,7). Zde je možné zobrazit podíl tekuté a tuhé fáze tak, že se zobrazují pouze místa, kde je stále tekutý kov a podíl tuhé fáze je skryt. Lze si tak udělat lepší obrázek o průběhu tuhnutí uvnitř odlitku. Na obrázku č. 50 je toto zobrazení pro řešený odlitek. Je zřejmé, že při vstupních podmínkách, které byly zvoleny, nálitek nad tepelným uzlem nedosazuje správně tekutý kov.



Obr. 50 Průběh tuhnutí

#### 4.4.3 Predikce porezity

Podstatným výsledkem, který vychází z numerické simulace tuhnutí je hodnota „Total Shrinkage Porosity“. Tato hodnota zobrazuje místa v odlitku, kde po jeho ztuhnutí chybí kov.

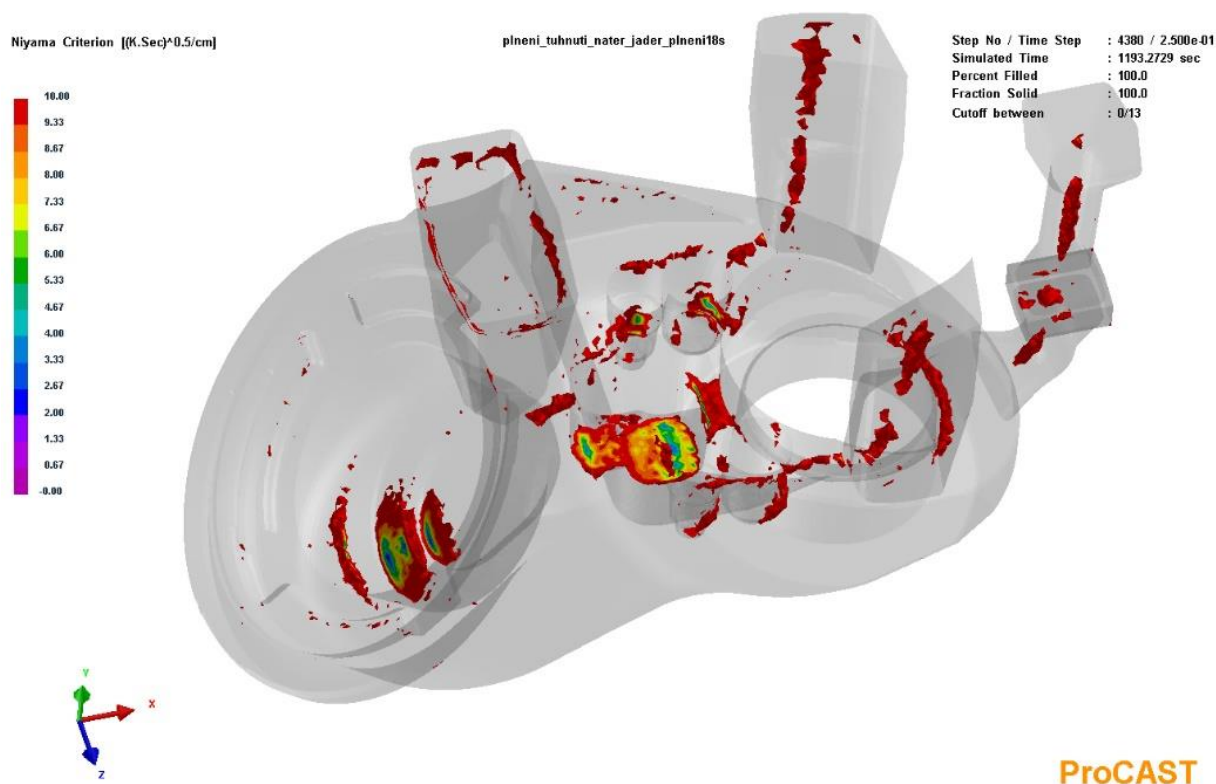


Obr. 51 Predikce porezity

Běžně se využívá opět zobrazení „Cut off“, kde se nastaví hodnota 5%. Zobrazeny jsou pak elementy, ve kterých chybí 5% kovu. Toto zobrazení je na obrázku č. 51. Staženina je predikována v tepelném uzlu, jak se dalo předpokládat z průběhu tuhnutí. Úprava funkce nálitku bude předmětem další kapitoly. V místech, kde se v odlitku staženiny vyskytují, se při výpočtu se zadanými vstupními parametry neprokázaly.

#### 4.4.4 Další možnosti v analýze tuhnutí

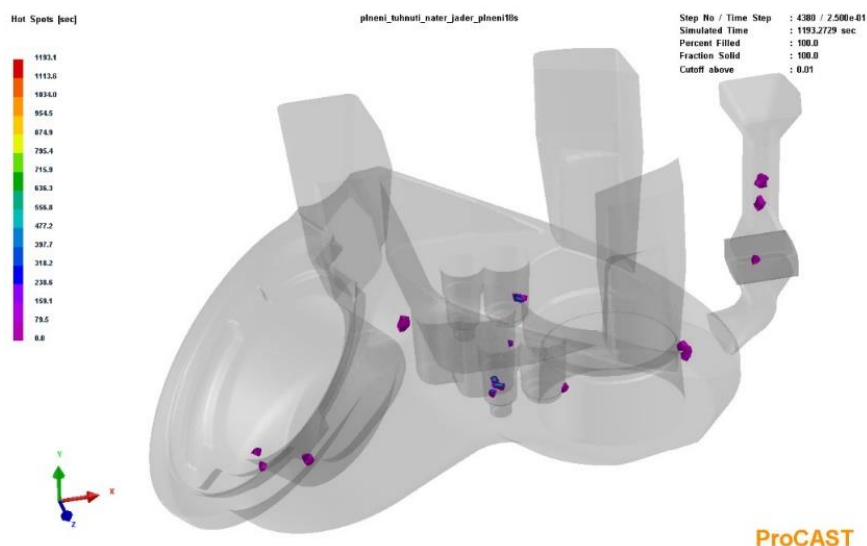
Kromě běžně využívaného pokročilého modulu predikce staženin je v ProCastu dostupný další model určený pro predikci staženin. Jedná se o Niyamovo kritérium, které vychází z teplotního gradientu a rychlosti ochlazování. Toto kritérium je definováno jako lokální teplotní gradient podělený druhou odmocninou ochlazovací rychlosti. Nižší hodnota znamená vyšší pravděpodobnost vzniku staženin. Kritické hodnoty pro hliníkové slitiny jsou 0 až 3  $[K \cdot s]^{0.5} / cm$  [21]. Na obrázku č. 52 je toto kritérium zobrazeno pro řešený odlitek. Minimální hodnoty kritéria jsou v blízkosti výstupků středového jádra a také u šikmého jádra. Tyto hodnoty jsou přibližně 4  $[K \cdot s]^{0.5} / cm$ . Nespadají tedy do kritického rozsahu.



Obr. 52 Niyamovo kritérium (stupnice 0 až 10  $[K \cdot s]^{0.5} / cm$ )

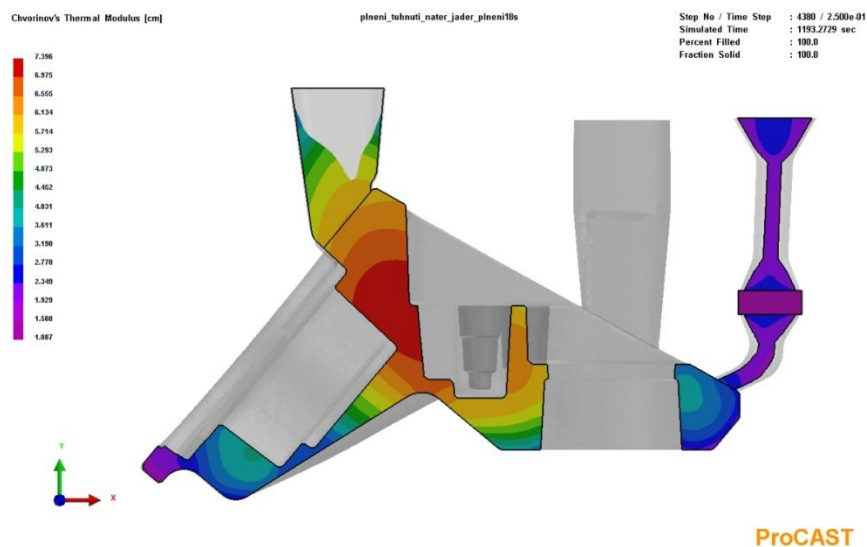
Další způsob predikce vad je pomocí funkce „Hot Spots“. Tato funkce zobrazuje tzv. izolovaná horká místa po ztuhnutí. Software zobrazuje elementy, které měly odlišný charakter tuhnutí od ostatních elementů. Tato funkce predikuje horká místa na více místech v odlitku včetně obvodu díry pro závit. Je zobrazena na obrázku č. 53.





Obr. 53 Predikce funkcí „Hot Spots“ (horká místa po ztuhnutí)

Další funkcí je „Chvorinov’s Thermal Modulus“. Jedná se o výpočet tepelného modulu odlitku, na základě Chvorinova vztahu. Zobrazen je na obrázku č. 54. Poloha tepelného uzlu je v místě, kde je největší hodnota vypočteného modulu. Nutno poznamenat, že je zde funkce uvedena spíše pro úplnost. V ideálním případě by se měla provést simulace bez nálitků, a na základě vypočteného modulu nálitky teprve navrhnout.



Obr. 54 Tepelný modul podle Chvorinova vztahu (stupnice 1 až 7,4 cm)

Numerickou simulací plnění a tuhnutí podle zvolených parametrů se nepodařilo prokázat příčiny vzniku vad v místech, kde byly dokázány analýzou na reálných dodaných odlitcích. Lze tedy konstatovat, že v reálných podmínkách výroby pravděpodobně vznikají odchylky od těchto zvolených parametrů. Předmětem další kapitoly bude tedy virtuální experiment, který má cíl objasnit příčiny vzniku vad analyzovaných v kapitole 3.2.2.

## 5 Rozbor vad odlitku numerickou simulací

V kapitole 4 byla provedena kompletní analýza plnění a tuhnutí vybraného odlitku podle zvolených parametrů (viz tabulka č. 4). Nutno také říci, že byla zanedbána skutečnost dolévání do středového nálitku. Provedený rozbor výsledků simulace predikuje vadu v masivní části odlitku pod hlavním nálitkem. V tomto místě ovšem podle informací ze slévárny není se staženinami problém. V kapitole 5.1 je provedeno upřesnění numerické simulace tak, aby v tomto ohledu odpovídala realitě.

### 5.1 Upřesnění numerické simulace

Po zpracování prvních verzí simulace, které predikovaly soustředěnou staženinu v tepelném uzlu pod nálitkem, byly provedeny řezy tímto místem odlitku pro ověření, zda se v těchto místech staženina nachází. Na obrázku č. 55 je znázorněno jakým způsobem byly řezy v podnálitkové části odlitku vedeny. Na obrázku č. 56 je potom tato část po provedení dělení.



Obr. 55 Způsob dělení podnálitkové části



Obr. 56 Rozřezaná podnálitkové část odlitku

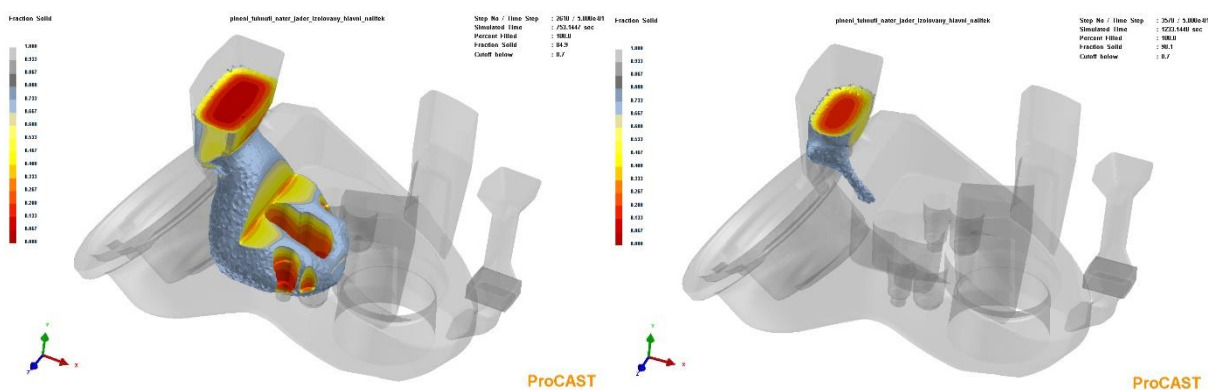
Na obrázku č. 57 lze vidět, že v podnálítkové části se nachází drobnější řediny o rozměrech přibližně 1 až 3 milimetry. Tyto řediny se ovšem nenachází v přídavcích pro obrábění a nečiní tak problémy. Také jsou ve značně masivní části odlitku a nepředpokládá se, že by snižovali mechanické vlastnosti pod přípustnou mez.



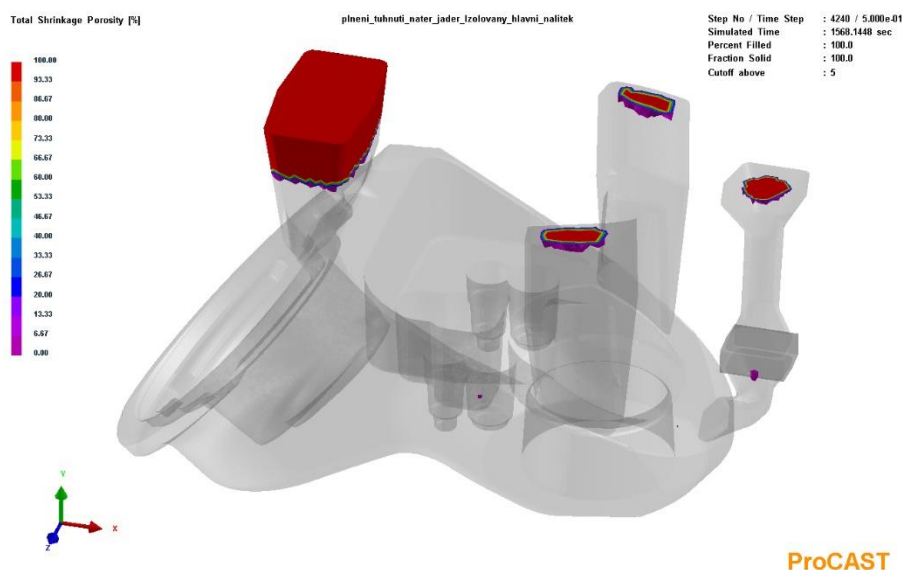
Obr. 57 Řediny v podnálítkové oblasti

Na základě této analýzy bylo tedy nutné provést upřesnění numerické simulace tak, aby její výsledky odpovídaly reálnému stavu. Důvodem této nepřesnosti bylo zanedbání dolévání do středového nálitku. To bylo do upravené simulace navrženo prostřednictvím snížení hodnoty koeficientu přestupu tepla na rozhraní nálietek – kokila. Jako ideální, nejlépe odpovídající v realitě dolévanému nálitku, byla po několika výpočtech zvolena hodnota koeficientu  $h = 200 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ . Tato aproximace je fyzikálně smysluplná, jelikož dolévaný kov ohřívá kov v nálitku podobně, jako omezený přestup tepla z kovu v nálitku do kokily drží teplotu v nálitku vyšší po delší dobu. O něco vyšší metalostatický tlak kovu v dolévaném nálitku byl při výpočtu zanedbán, jelikož neovlivňuje formování tepelného uzlu v odlitku a dosazování do něj. Ostatní parametry zůstaly pro tuto verzi stejné, jako bylo definováno v tabulce č. 4.

Na obrázku č. 58 a č. 59 jsou zobrazeny výsledky simulace tuhnutí a predikce staženin s upravenou funkcí nálitku. Již se zde nenachází soustředěná staženina a nálietek správně dosazuje kov do tepelného uzlu v nahromadění materiálu. Tento stav odpovídá funkci v realitě dolévaného nálitku.

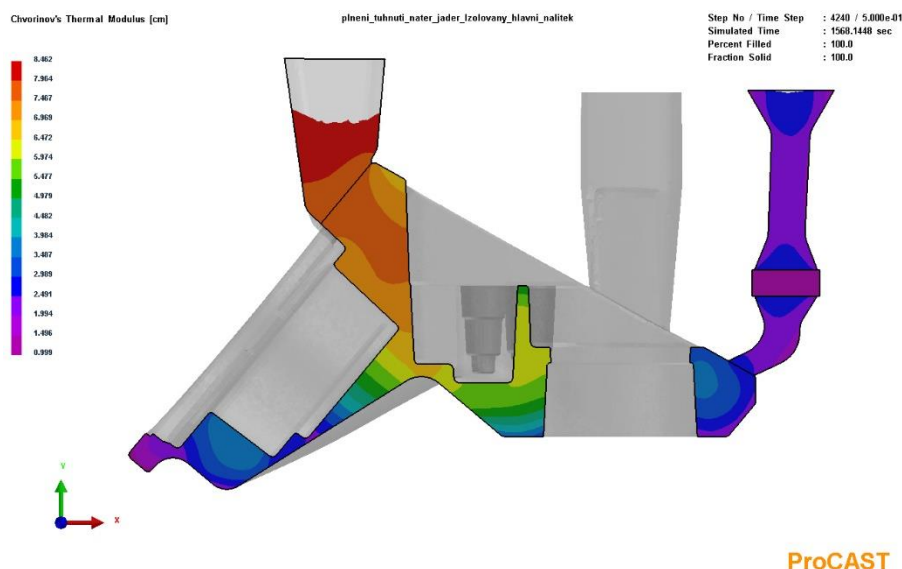


Obr. 58 Tuhnutí s doléváním do nálitku



Obr. 59 Porezita s doléváním do nálitku

V této doladěné variantě již není poslední tuhnoucí kov izolován v geometrickém tepelném uzlu odlitku. Tuto skutečnost potvrzuje také zobrazení tepelného modulu podle Chvorinova na obrázku č. 60.



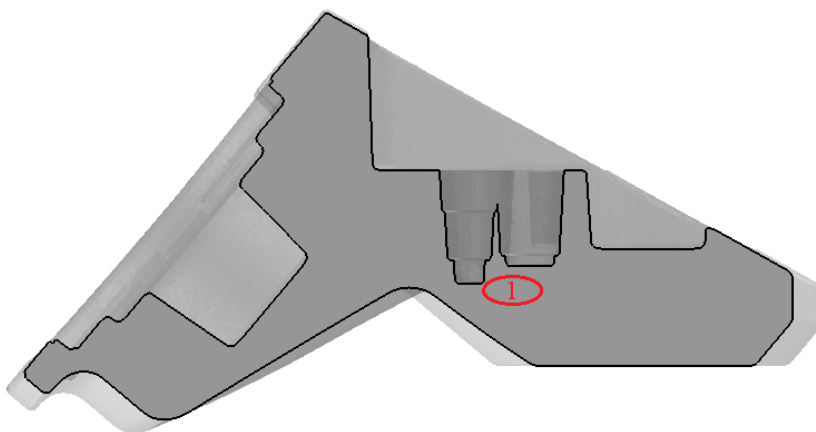
Obr. 60 Tepelný modul podle Chvorinova vztahu (stupnice 1 až 8,5 cm)

Z předchozích výsledků numerických simulací neplyne predikce porezity v kritických místech, kde byl prokázán výskyt vady. Ve výrobě tedy pravděpodobně nastávají odlišné podmínky, než byly zvoleny do první varianty simulace. V této fázi praktické části práce bylo vypočteno asi 40 variant numerických simulací. Dále zde budou shrnuty některé z nich, které objasňují možné příčiny vzniku detekovaných vad. V těchto variantách byla již upravena funkce nálitku, která nyní odpovídá ve výrobě dolévanému nálitku.



## 5.2 Simulace vady v oblasti 1

Jak bylo popsáno v kapitole 3.2.2, jedná se o dvě kritické oblasti v okolí neprůchozích předlévaných otvorů pro závit, kde se vyskytuje vada analýzou určena jako staženina. Oblast 1 je vyznačena na obrázku č. 61. V následujících podkapitolách budou shrnuty verze numerických výpočtů, které vedly k objasnění příčiny vzniku této vady. Ve variantách 1A až 1C nebylo importováno rozložení teplotního pole po pátém cyklu, ale testoval se vliv různých teplot jednotlivých částí kokily a jader na průběh tuhnutí. Teploty byly voleny jako konstanty.



Obr. 61 Oblast výskytu staženin 1

### 5.2.1 Vliv prvního cyklu (Varianta 1A)

Tab. 5 Variace vstupních parametrů pro simulování vlivu prvního cyklu

Teplota celého systému kokily a jader	200°C, 300°C, 400°C
Nátěr jader	Dycote 5 (tloušťka 0,8 mm)

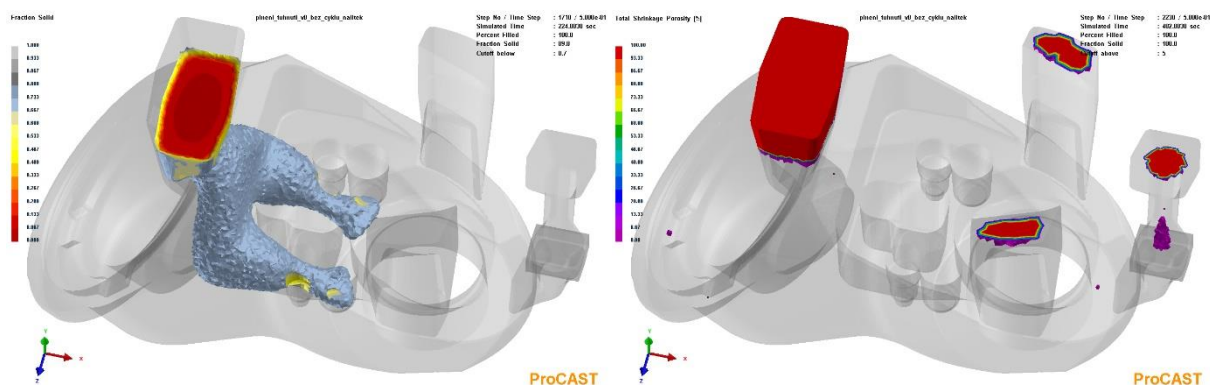
První soubor variant je ověření, zda by příčinou vady mohla být nízká teplota kokily a jader na počátku výrobního cyklu. Teplota všech částí byla vždy zvolena jako konstantní hodnota. Vycházelo se ze závěrů vyvozených z vypočteného cyklování formy, kde byl v prvním cyklu zřetelný větší sklon k oddělení tekuté fáze. Bylo předmětné tento závěr ověřit, protože výsledky cyklování nepočítají s plněním formy a predikce porezity také není počítána.

Varianty byly počítány na základě tabulky č. 5. S rostoucí volenou počáteční teplotou se sklon k oddělení tuhnutí v kritickém místě pod předlévanými otvory snižoval. Jako charakteristická varianta, která nejlépe prokazuje negativní vliv prvního cyklu, kdy může být forma nedostatečně předeřtá je označena 1A (viz tabulka č. 6).

Tab. 6 Vstupní parametry – varianta 1A

Teplota celého systému kokily a jader	200°C
Nátěr jader	Dycote 5 (tloušťka 0,8 mm)

Z tuhnutí v kritickém místě pod středovým jádrem je zřetelný sklon k oddělení tekutého kovu (viz obrázek č. 62). Nicméně modul pro predikci porezity v tomto místě vadu nepředpokládá. Na základě této varianty se slévárně doporučuje dále vyhodnocovat, které odlitky z výrobního cyklu jsou neshodné, a ověřit tak možný vliv prvních cyklů. To bohužel nebylo z důvodů kampaňovité výroby této položky možné zahrnout do této práce.



Obr. 62 Tuhnutí a predikce porezity – varianta 1A

### 5.2.2 Vliv přehřátí v oblasti pod středovým jádrem (Varianta 1B)

Další předpoklad vycházel ze skutečnosti, že slévárna zavedla jako nápravné opatření chlazení středového jádra vodou. Předpokladem tedy bylo, že vada by měla vznikat v oblasti pod středovým jádrem z důvodu delší doby tuhnutí v této oblasti.

Tab. 7 Variace vstupních parametrů pro simulování vlivu přehřátí pod středovým jádrem

Teplota středového a spodního jádra	350°C, 400°C, 450°C
Teplota šikmého jádra	250°C
Teplota kokily	250°C
Nátěr jader	Dycote 5 (tloušťka 0,8 mm)

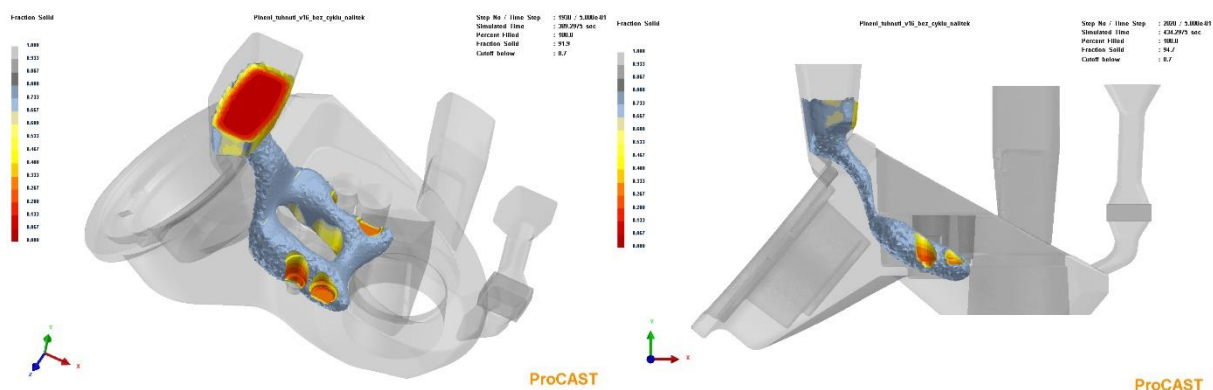
Byla otestována série variant podle tabulky č. 7. Se zvyšující se volenou teplotou středového a spodního jádra, se finální fáze tuhnutí přesouvala do oblasti pod středové jádro. Jako charakteristická varianta, která nejlépe ukazuje vliv přehřátí v této oblasti je označena 1B. Vstupní parametry této varianty jsou popsány v tabulce č. 8.

Tab. 8 Vstupní parametry – varianta 1B

Teplota středového a spodního jádra	450°C
Teplota šikmého jádra a kokily	250°C
Nátěr jader	Dycote 5 (tloušťka 0,8 mm)

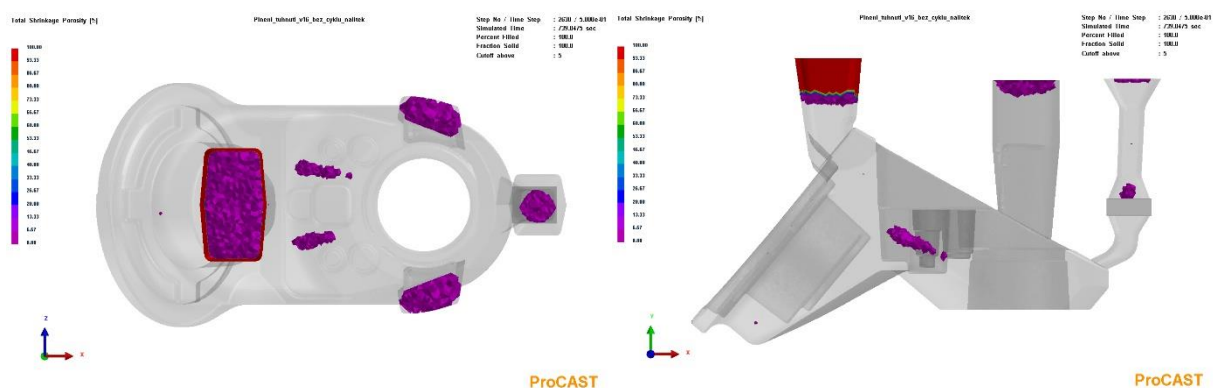
Varianta 1B dokazuje, že přehřáté středové jádro není pravděpodobnou příčinou vzniku vady v oblasti 1. Z obrázku č. 63 je zřejmé, že se z důvodu zvýšení teploty středového a spodního jádra konečná fáze tuhnutí přesunula z geometrického tepelného uzlu pod nálitkem do oblasti

pod středovým jádrem. Je zřejmé, že v tomto případě nehrozí přerušení tuhnoucí fáze v kritickém místě u výstupků středového jádra.



Obr. 63 Tuhnutí – varianta 1B

Predikce porezity na obrázku č. 64 také nepředpokládá vady v oblasti 1. Navíc se vytváří rozsáhlé soustředěné staženiny v místech, kde nebyly v analyzovaném odlitku přítomny.



Obr. 64 Predikce porezity – varianta 1B

Z varianty 1B lze usoudit, že příčina vzniku vady nebude přehřátí částí kokily nebo jader, způsobující kompletní oddělení fronty tuhnutí od středového nálitku. Kromě variace uvedené v tabulce č. 7 se testoval vliv přehřáté spodní desky. Také z těchto simulovaných variant vyplynulo, že pokud by byl tepelný uzel, tedy místo kde tuhne poslední kov, posunut do této oblasti, vznikaly by velké soustředěné staženiny v jiných místech než na odlitcích, na kterých byla provedena analýza (viz obrázek č. 64). Z varianty 1A naopak vyplývá, že pravděpodobnější příčinou, než přehřátí středového jádra, budou jeho nízké teploty.

### 5.2.3 Vliv chladného středového jádra (Varianta 1C)

Ve variantě 1A byl simulován pouze souhrnný vliv v případě, že má nízkou teplotu celý kokilový systém. Tato podkapitola již bude demonstrovat stav, kdy má v kokilovém systému nízké teploty pouze středové jádro.

Tab. 9 Variace vstupních parametrů pro simulování vlivu nízké teploty středového jádra

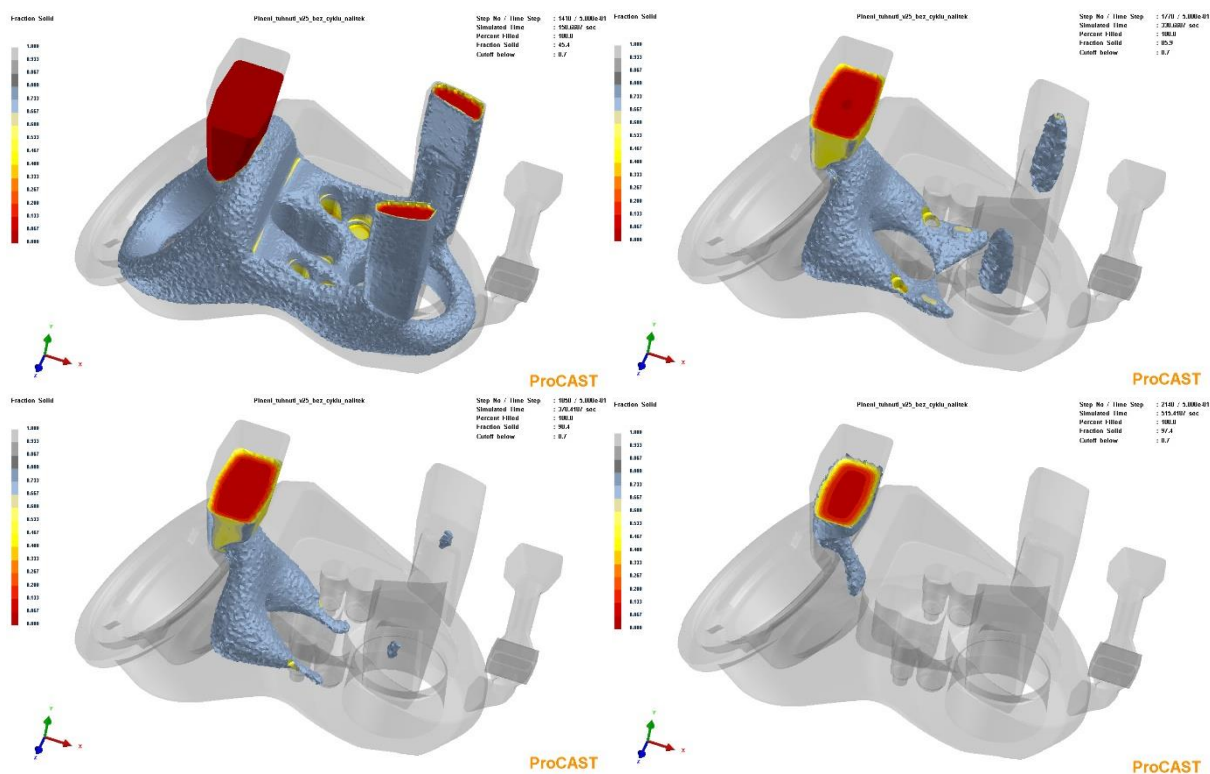
Teplota středového jádra	200°C, 250°C, 300°C
Teplota spodního jádra	350°C
Teplota šikmého jádra	350°C
Teplota kokily	350°C
Nátěr jader	Dycote 5 (tloušťka 0,8 mm)

V tabulce č. 9 jsou opět shrnuty podmínky vstupující do tohoto testovaného stavu. Se snižující se volenou teplotou dochází ke zřetelnějšímu oddělování tekuté fáze v kritické oblasti blízko předlévaných otvorů. Jako nejprokazatelnější tedy byla vybrána varianta s nejnižší zvolenou teplotou (viz tabulka č. 10).

Tab. 10 Vstupní parametry – varianta 1C

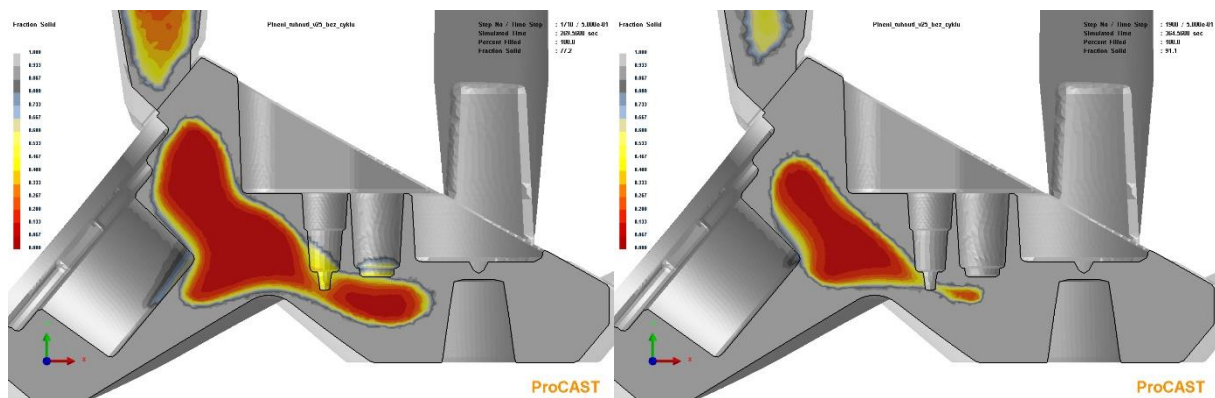
Teplota středového jádra	200°C
Teplota kokily, šikmého a spodního jádra	350°C
Nátěr jader	Dycote 5 (tloušťka 0,8 mm)

Na obrázku č. 65 je zobrazen průběh tuhnutí. Při průchodu fronty tuhnutí kolem předlévaných otvorů dochází k oddělení tekuté fáze. Je zřejmé, že toto místo v odlitku je kritické a je náchylné na vznik staženin. Lépe je tato skutečnost názorná na řezu zobrazení frakce solidu na obrázku č. 66.



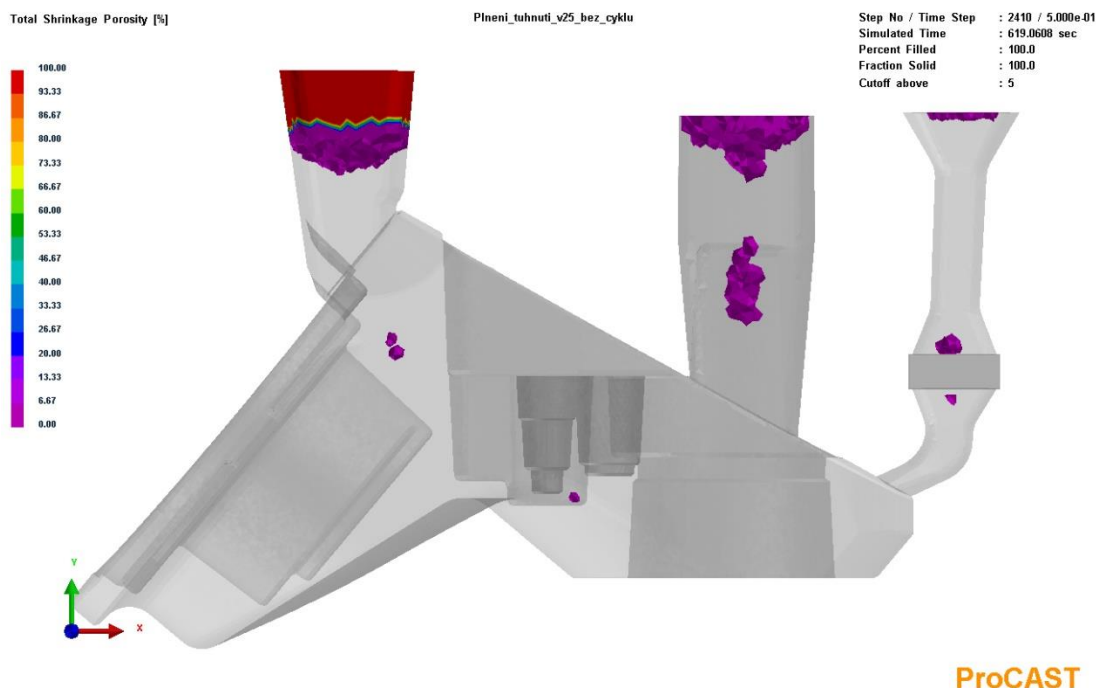
Obr. 65 Průběh tuhnutí – varianta 1C





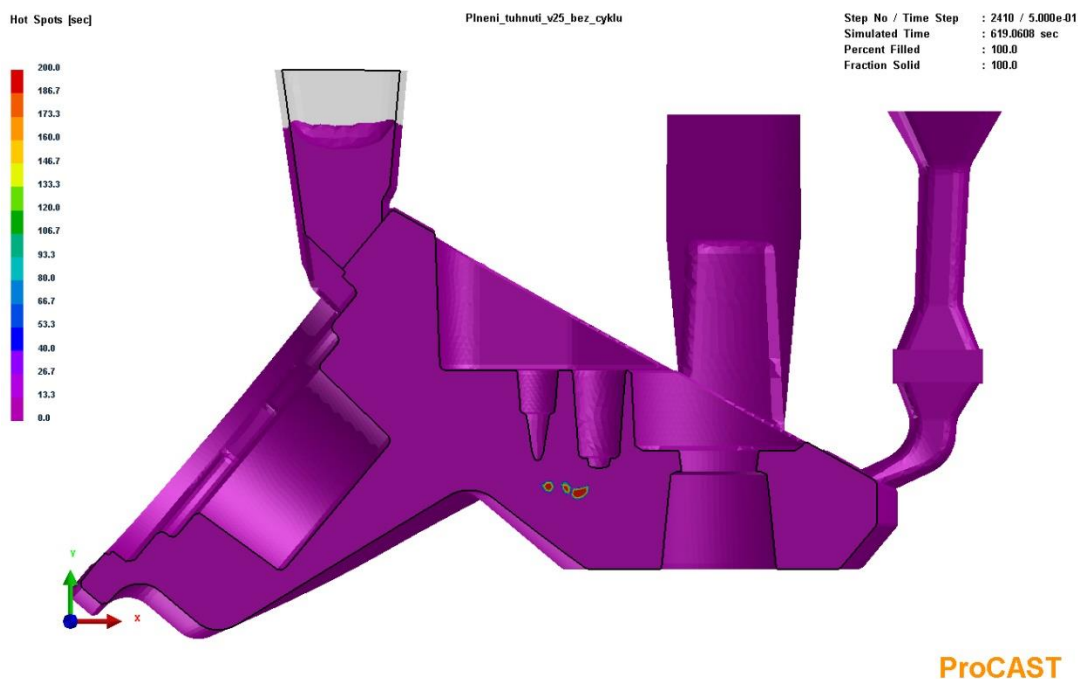
Obr. 66 Oddělení tekuté fáze – varianta 1C

Na obrázku č. 67 je predikce porezity pro tuto variantu. Zde již software předpokládá porezitu v místě, kde byla detekována a následnou analýzou potvrzena staženina. Porezita je zde predikována také pod nálitkem, nicméně i na analyzovaném kusu byly drobnější řediny pod nálitkem objeveny (viz obrázek č. 56). Jeho zhoršená funkce může být také způsobena konstantně zadanou teplotou 350°C, která je nižší než teploty vypočtené cyklováním (viz obrázek č. 30). Nicméně předmětem této varianty bylo prokázat, že nižší teplota středového jádra má negativní vliv, což se prokázalo.



Obr. 67 Predikce porezity – varianta 1C

Také funkce „Hot Spots“ predikuje vznik oddělených horkých míst v oblasti 1 (viz obrázek č. 68). Je zobrazen řez odlitkem v kritickém místě. Na obrázku č. 69 je fotografie části analyzovaného odlitku, která potvrzuje místo výskytu predikované porozity a horkých míst pomocí numerické simulace.



Obr. 68 Predikce oddělených horkých míst



Obr. 69 Fotografie vady potvrzující výsledky numerické simulace

#### 5.2.4 Vliv chlazení středového jádra na cyklování (Varianta 1D)

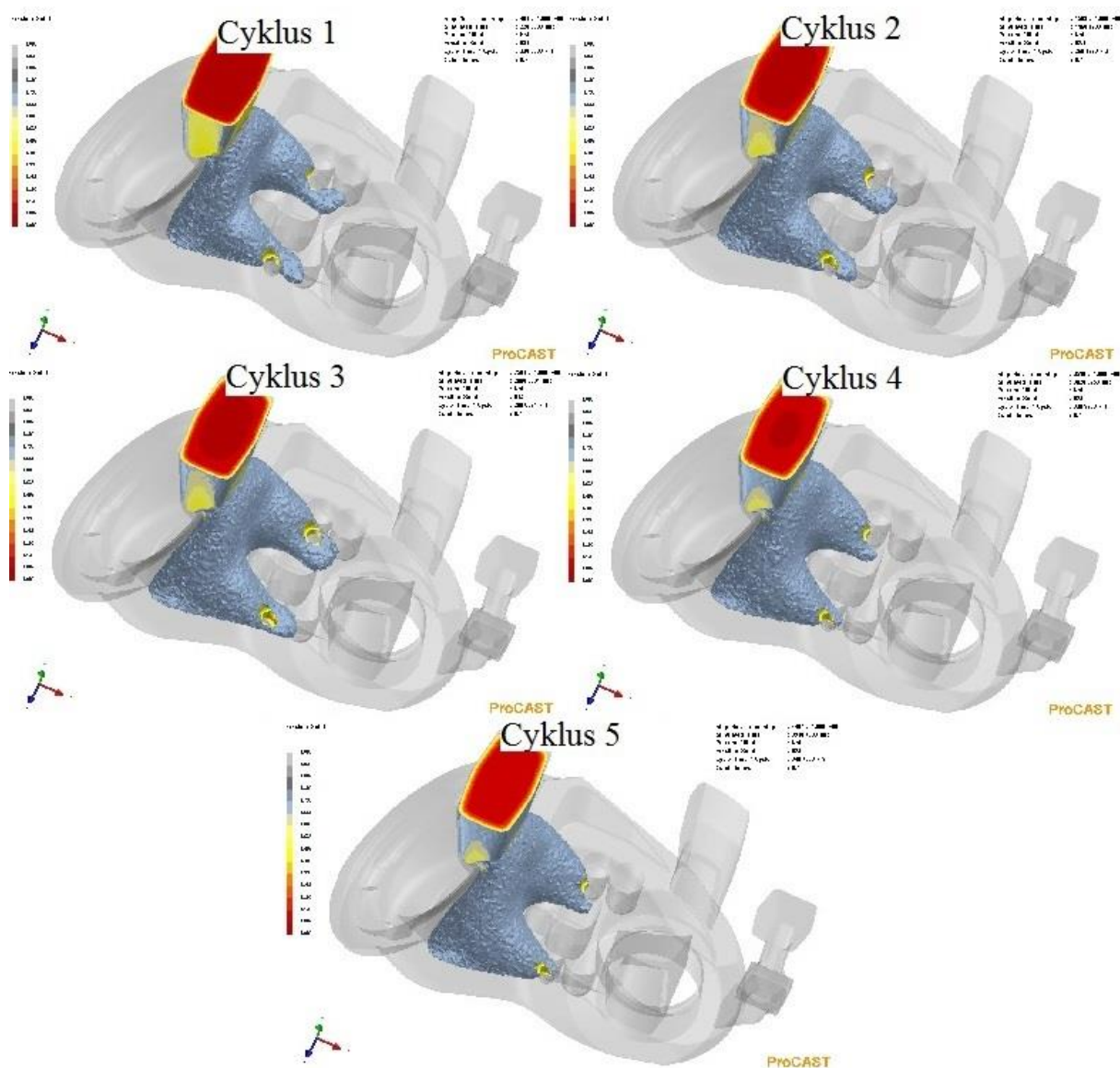
V úvodní variantě cyklování bylo chlazení středového jádra zanedbáno. Provádí se nalitím vody do jádra hadicí, kdy není nijak blíže specifikováno její množství, ani čas, kdy se toto chlazení běžně provádí. Je tedy obtížné do numerické simulace nadefinovat podmínky tohoto chlazení tak, aby odpovídaly realitě. Varianta 1C nicméně dokázala, že pokud je jádro chladnější, sklon ke vzniku vady v důsledku oddělení tekuté fáze je větší. Byla tedy vypočtena upravená verze výrobního cyklu, kde bylo chlazení jádra zohledněno. Teploty přehřevu jsou stejné jako v úvodní variantě (300°C), ale středové jádro má na začátku

každého cyklu 200°C (viz tabulka č. 11). Taková situace může reálně nastat, jelikož podle poskytnutých informací se kromě středového jádra žádné jiné chlazení neprovádí.

Tab. 11 Vstupní parametry – varianta 1D (cyklus)

Vstupní parametry pro cyklování	Viz tabulka č. 4
Počáteční teplota středového jádra na začátku každého cyklu	200°C
Nátěr jader	Dycote 5 (tloušťka 0,8 mm)

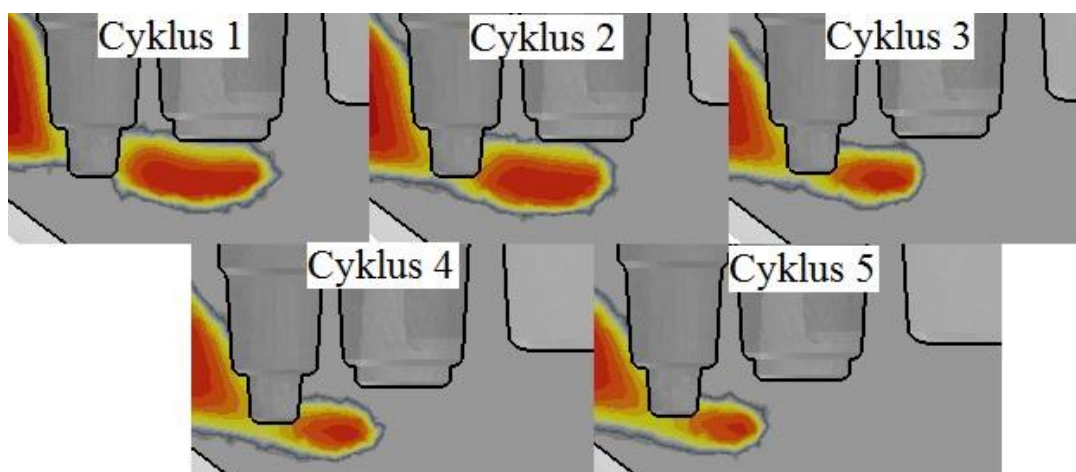
Na obrázku č. 70 je průběh tuhnutí v kokile s upraveným cyklováním. Pro srovnání s původním cyklem (viz obrázek č. 28), kde nebylo středové jádro chlazeno je zobrazení v režimu „Cut off“. Z průběhu tuhnutí vyplývá, že v tomto případě cyklování bude větší sklon ke vzniku vad v důsledku oddělení části tekuté fáze v průběhu tuhnutí.



Obr. 70 Průběh tuhnutí – varianta 1D (cyklus)

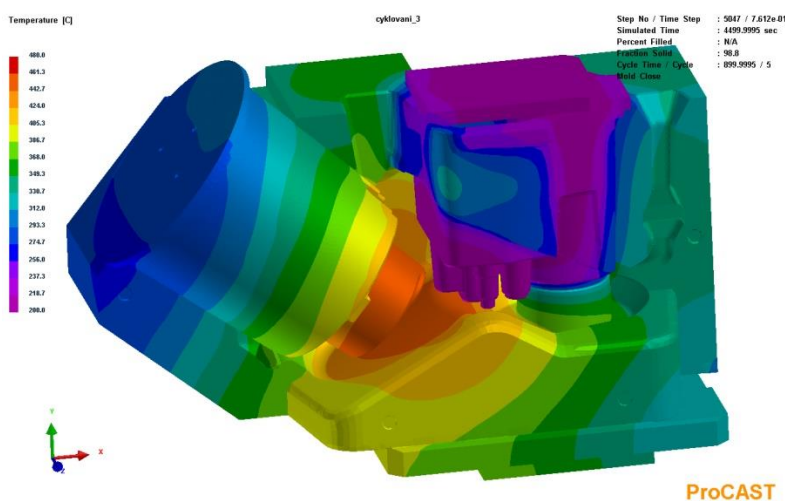
Lze tedy konstatovat, že chlazení středového jádra vodou, nebo jakýmkoli jiným způsobem nevede ke snížení pravděpodobnosti výskytu vad v analyzovaném místě označeném jako oblast 1. Na základě vypočtených variant 1C a 1D se tedy provádět chlazení vodou, které navíc není regulováno ani předepsáno, se dále nedoporučuje.

Pro větší názornost rozdílů v tuhnutí mezi jednotlivými cykly, kdy se forma postupně prohřívá je uvedeno zobrazení průběhu tuhnutí v řezu (viz obrázek č. 71). I v tomto případě se s prohřívající se formou sklon k tvorbě vady snižuje. Je to způsobeno tím, že prohřátá forma před litím ohřívá studené jádro a také přestup tepla do více prohřáté kokily není tak intenzivní a pásmo tuhnutí v oblasti pod středovým jádrem se celkově rozšiřuje.



Obr. 71 Průběh tuhnutí v řezu – varianta 1D

Jak je ovlivněno rozložení teplot ve výrobním cyklu, kde je středové jádro v každém cyklu chlazeno na 200°C je vidět na obrázku č. 72. Na tomto obrázku je výsledné rozložení teplotního pole po pátém cyklu (před litím šestého kusu). Lze přibližně určit, že teploty zbylých částí kokily a jader jsou kvůli ochlazovanému středovému jádru nižší přibližně o 50°C oproti původnímu cyklu bez chlazení jádra (viz obrázek č. 30)

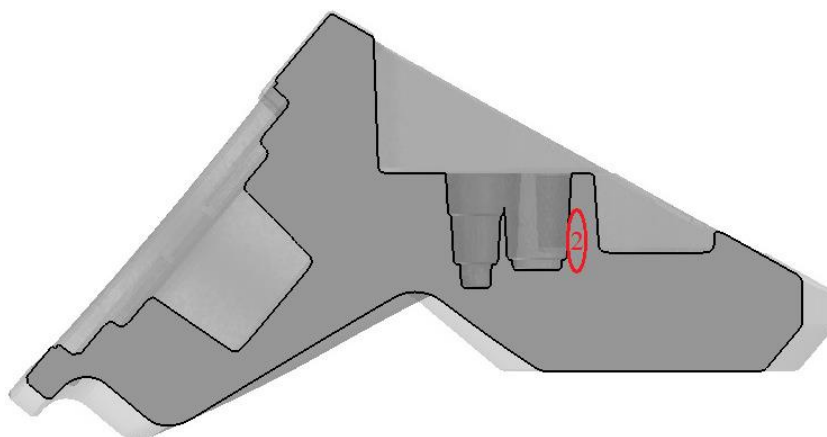


Obr. 72 Výsledné rozložení teplot po pátém cyklu (stupnice 200 – 480°C)



### 5.3 Simulace vady v oblasti 2

V kapitole 3.2.2 byly popsána dvě místa, ve kterých byly zdokumentovány problémy s výskytem vad. Vady v oblasti 1 byly blíže analyzovány a simulací zdůvodněny jejich příčiny. Vady, nacházející se na obvodu neprůchozích otvorů pro závit (viz obrázek č. 73) jsou zdokumentovány pouze na fotografii na obrázku č. 12. Nicméně podle informací slévárny, jsou právě vady v těchto místech častou příčinou neshodných kusů. Tyto vady je možné odhalit vizuální kontrolou po obrobení závitu. Na základě provedených variant numerických simulací je zřejmé, že vady v oblasti 1 a vady v oblasti 2, mohou mít rozdílné příčiny vzniku. Zatímco největší sklon k tvorbě vady v oblasti 1 byl prokázán v případech, kdy je chladné středové jádro, vady v oblasti 2 byly predikovány ve variantách numerické simulace, kde jádro chlazené nebylo.



Obr. 73 Oblast výskytu vady 2

#### 5.3.1 Vliv snížení intenzity přestupu tepla (Varianta 2A)

Simulace v kapitole 5.2 se zabývaly vlivem rozdílných teplot různých objemů modelu. Vady v oblasti 2 byly naopak predikovány ve verzích simulací, kde se testoval vliv změn hodnot koeficientů přestupu tepla na rozhraních jader a odlitku (viz tabulka č. 12)

Tab. 12 Variace vstupních parametrů pro simulování vlivu intenzity přestupu tepla do jader

Nehomogenní nacyklované teplotní pole	Viz tabulka č. 4
Koeficient přestupu tepla – Středové jádro	$h = 750, h = 300 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
Koeficient přestupu tepla – Spodní jádro	$h = 750, h = 300 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
Koeficient přestupu tepla – Šikmé jádro	$h = 2000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
Koeficient přestupu tepla – Kokila	$h = 2000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
Nátěr jader	Dycote 5 (tloušťka 0,8 mm)

V úvodní variantě cyklování bylo uvažováno minimální chlazení, forma byla tedy značně prohrátá a nebyla predikována porezita v místech předlitých otvorů. Předpoklad pro testování vlivu snižování koeficientu přestupu tepla byl opět založen na slévárnou realizovaném

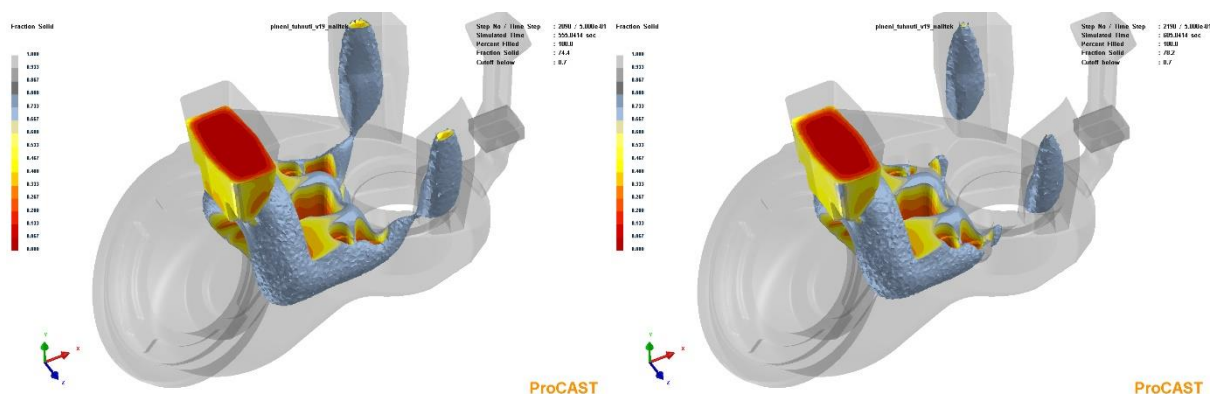


nápravném opatření chlazení středového jádra. Předpokládalo se, že snížení intenzity přestupu tepla do středového a spodního jádra, koncentruje finální fázi tuhnutí do oblasti pod středovým jádrem. Jako varianta více charakterizující důsledek tohoto experimentu byla vybrána ta s nižšími koeficienty, tedy nižší intenzitou přestupu tepla (viz tabulka č. 13).

Tab. 13 Vstupní parametry – varianta 2A

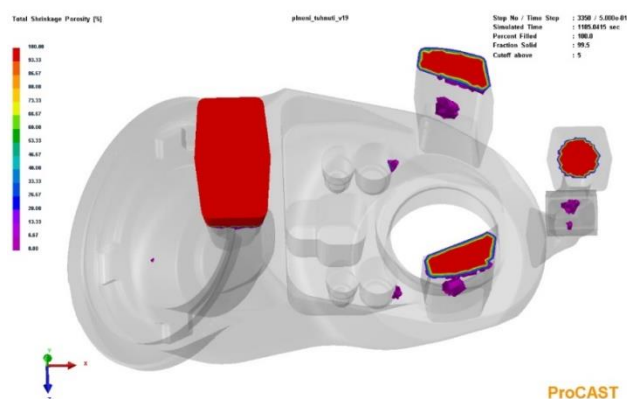
Nehomogenní nacyklované teplotní pole	Viz tabulka č. 4
Středové jádro a spodní jádro	$h = 300 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
Kokila a šikmé jádro	$h = 2000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
Nátěr jader	Dycote 5 (tloušťka 0,8 mm)

Na obrázku č. 74 vpravo, je zřetelný okamžik, kdy při tuhnutí dochází k oddělení tekuté fáze. V tomto místě je predikována také porezita (viz obrázek č. 75). Tato varianta nemá velký praktický význam, jelikož změny intenzit přestupů tepla na rozhraních mohou být způsobeny více příčinami. Například vrstvou nebo typem nátěru. Nicméně varianta 2A dobře teoreticky ukazuje, jaký může být charakter vzniku vady v oblasti 2.



Obr. 74 Průběh tuhnutí – varianta 2A

Z této varianty, která je dosažitelná pouze teoreticky, vyplývá otázka, zda není vznik vady v oblasti 2 spojen s funkcí bočních nálitků. Ověřením správného fungování těchto nálitků se budou zabývat následující varianty simulací.



Obr. 75 Predikce porezity – varianta 2A

### 5.3.2 Vliv účinnosti izolace bočních nálitků (Varianta 2B)

Tato varianta se bude zabývat funkcí bočních nálitků. Je vypočtena s cílem jejího srovnání s původní variantou podrobně analyzovanou v kapitole 4. Jedinou změnou je zvýšení účinnosti izolace na bočních nálitcích. V tabulkách č. 14 a č. 15 jsou shrnuty údaje, jejichž vliv bude srovnáván na těchto dvou jinak se nelišících variantách.

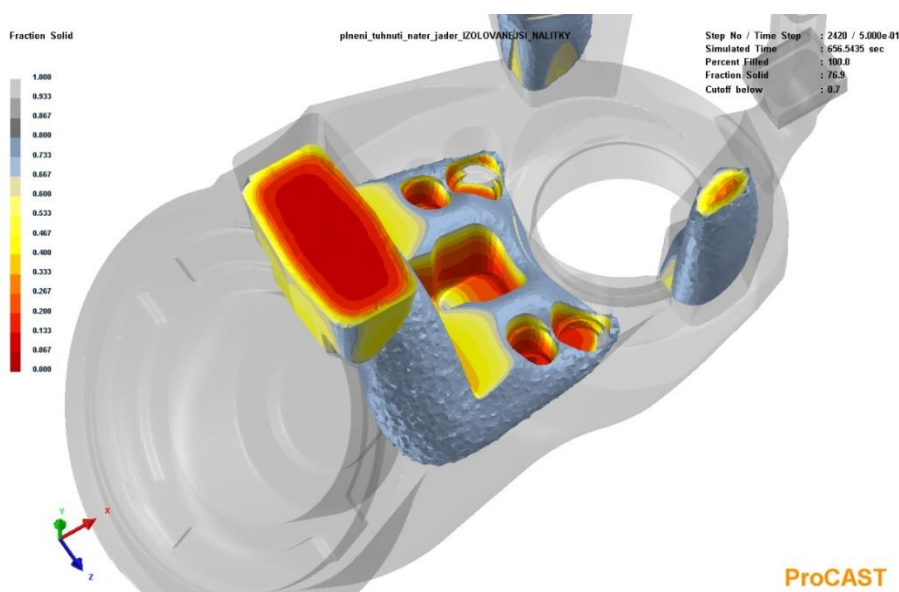
Tab. 14 Vstupní parametry – varianta 2B

Nehomogenní nacyklované teplotní pole	Viz tabulka č. 4
Kokila a všechna jádra	$h = 2000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
Boční nálitky	$h = 200 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
Nátěr jader	Dycote 5 (tloušťka 0,8 mm)

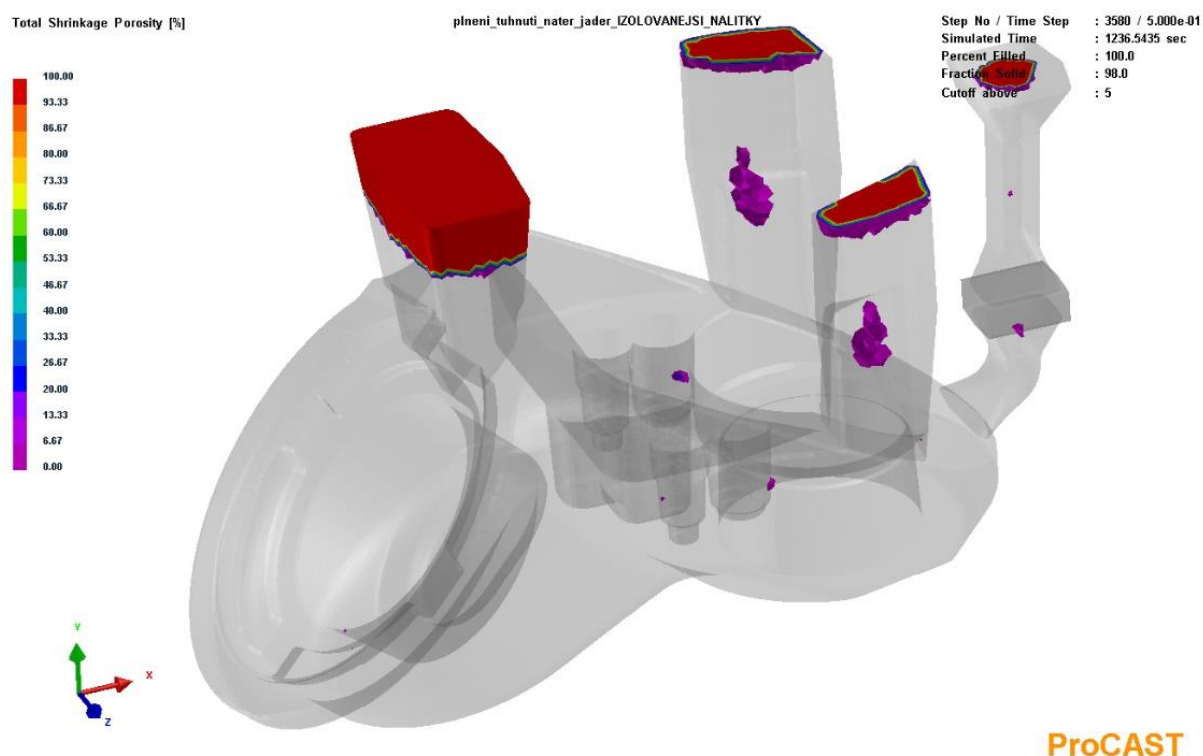
Tab. 15 Vstupní parametry – úvodní varianta

Nehomogenní nacyklované teplotní pole	Viz tabulka č. 4
Kokila a všechna jádra	$h = 2000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
Boční nálitky	$h = 1000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
Nátěr jader	Dycote 5 (tloušťka 0,8 mm)

V technologické kartě není specifikována tloušťka izolačního nátěru ani četnost jeho obnovy v průběhu cyklu. Je tedy předmětné ověřit, jak fungují nálitky s různou schopností izolace. V této variantě byla snížena prostřednictvím hodnoty přestupu tepla na rozhraní bočních nálitků a kokily. To může být praxi způsobeno nanesením silné nové vrstvy izolačního nátěru, popřípadě zvýšenými teplotami na rozhraní boční nálitky – forma. Také tomuto stavu přispívá případné dolévání tekutého kovu do těchto bočních nálitků během tuhnutí. Na obrázku č. 76 je na průběhu tuhnutí zřetelné oddělení, které může být příčinou vady v oblasti 2. V tomto místě je následně predikována porezita (viz obrázek č. 77).

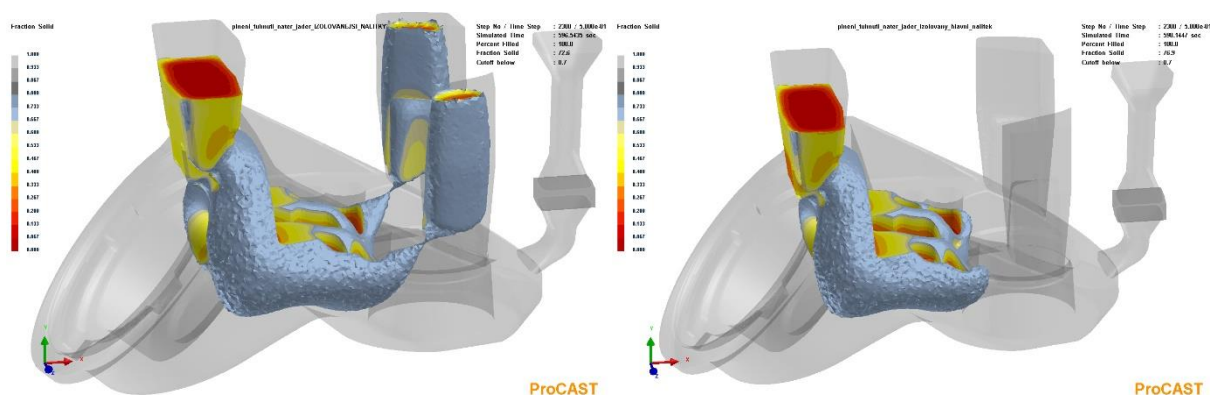


Obr. 76 Průběh tuhnutí – varianta 2B

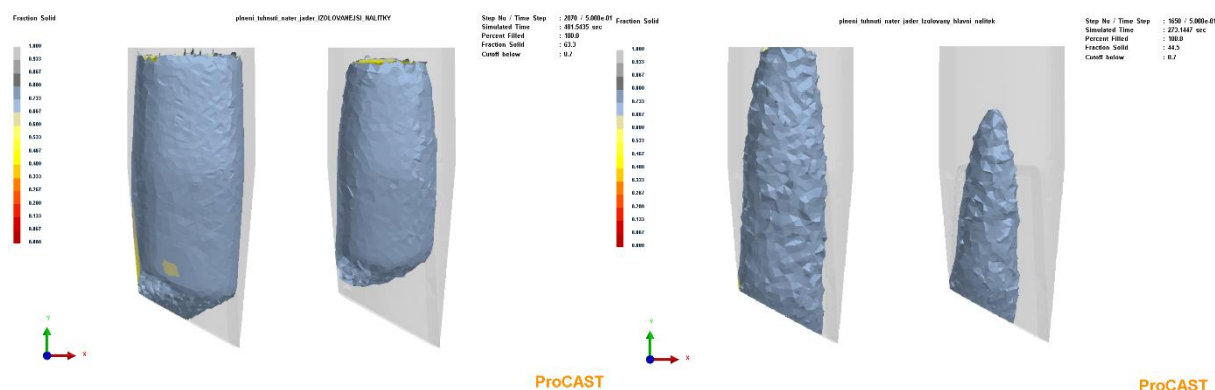


Obr. 77 Predikce porezity – varianta 2B

Zajímavé je srovnání varianty 2B (více izolované boční nálitky) a úvodní varianty (méně izolované boční nálitky). Na obrázku č. 78 je provedeno srovnání ve stejném čase od počátku tuhnutí. Je zde zřejmá příčina oddělení tekuté fáze. Děle tuhnoucí nálitky drží frontu tuhnutí po delší čas v oblasti obvodu předlévaných neprůchozích otvorů. Funkce bočních nálitků se na základě této varianty nezdá být příliš vhodná, protože dříve tuhnoucí nálitky, paradoxně ve výsledku vede k menšímu sklonu k vytvoření vady v oblasti 2. Na obrázku č. 79 je srovnání charakteru tuhnutí méně a více izolované nálitky.



Obr. 78 Srovnání varianty 2B – vlevo a úvodní varianty – vpravo (stejný čas od počátku tuhnutí)



Obr. 79 Srovnání charakteru tuhnutí bočního nálitku varianty 2B – vlevo a úvodní varianty – vpravo

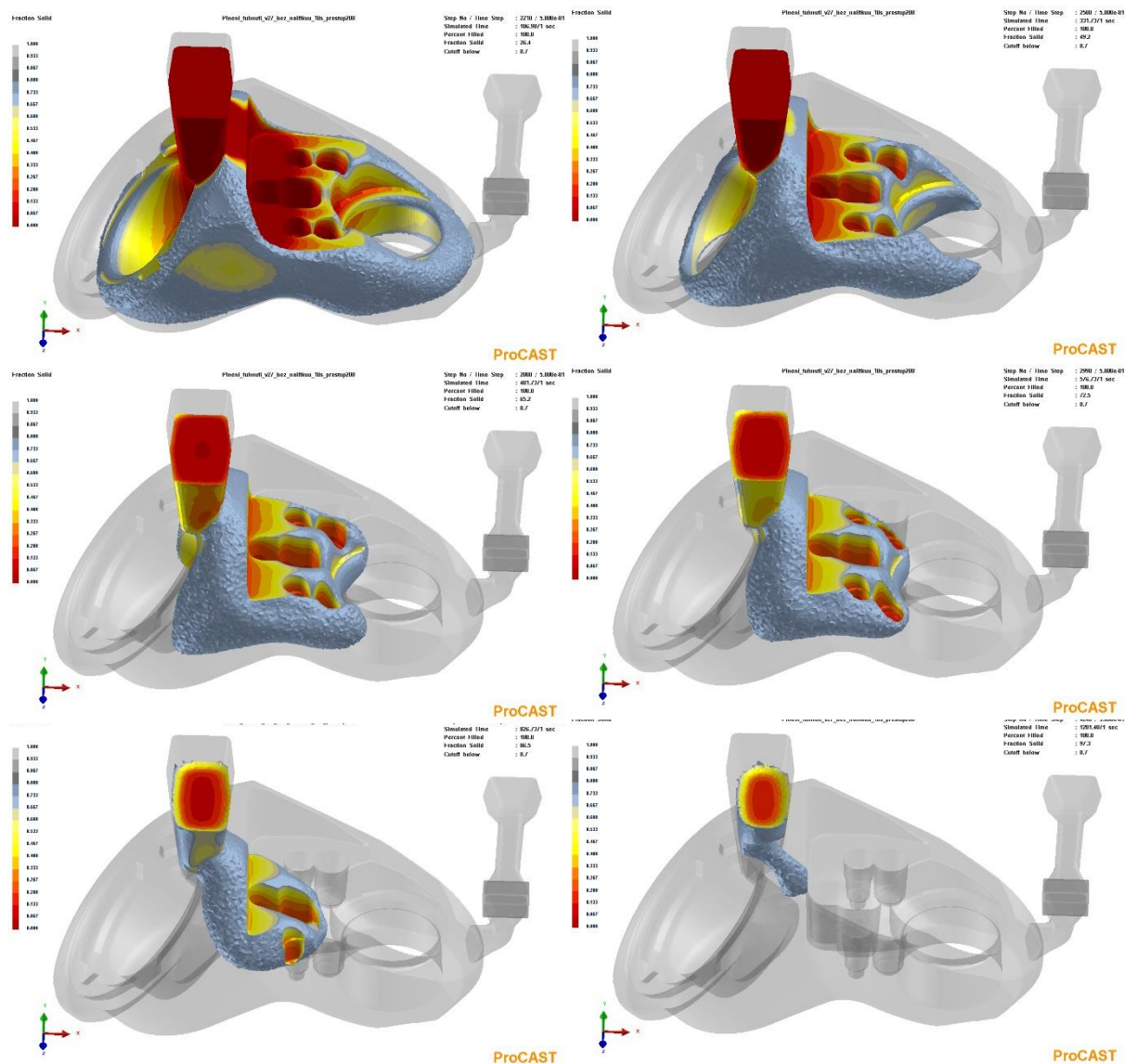
### 5.3.3 Vliv zaslepení bočních nálitků (Varianta 2C)

Z varianty 2B plyne, že boční nálitky ovlivňují vznik vady v oblasti 2 v případě, že je prodloužena doba jejich tuhnutí. Z průběhu tuhnutí odlitku není jednoznačně prokazatelné, zda jsou boční nálitky pro dosazování tekutého kovu do oblasti pod nimi nezbytné. Byla tedy vypočtena varianta 2C, ve které byly boční nálitky na modelu v ProCastu zcela zaslepeny. Jejich objem byl vyplněn ocelí stejného typu, jako je přiřazen kokile a jádrům. Ostatní podmínky zůstaly stejné jako u úvodní varianty se zohledněním dolévání do nálitku (viz tabulka č. 16).

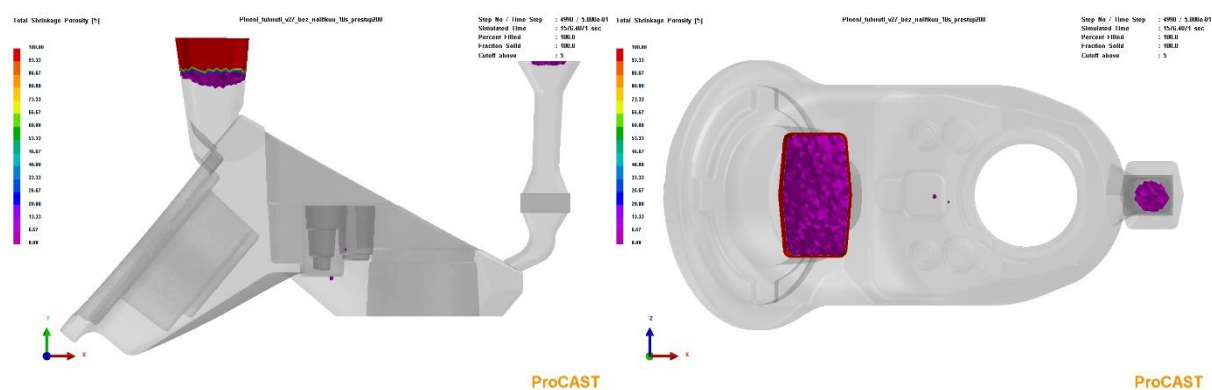
Tab. 16 Vstupní parametry – varianta 2C

Nehomogenní nacyklované teplotní pole	Viz tabulka č. 4
Boční nálitky	Zaslepeny (Ocel H11)
Nátěr jader	Dycote 5 (tloušťka 0,8 mm)

Z obrázku č. 80 vyplývá, že tuhnutí probíhá usměrněně do tepelného uzlu pod středovým nálitkem. Tento nálitek zásobuje tepelný uzel tekutým kovem a tuhnutí končí v objemu nálitku. Není zde zřetelný sklon k tvorbě vady v oblasti 2. V oblasti 2, ani v oblasti 1 není softwarem predikována porezita (viz obrázek č. 81). Lze tedy konstatovat, že boční nálitky průběh tuhnutí spíše komplikují, jelikož zvětšují tepelný uzel a ovlivňují dobu tuhnutí odlitku v oblasti pod nálitky. Tepelný uzel odlitku je soustředěn pod středový nálitek, který se zdá být objemově dostatečným v případě provádění jeho dolévání.



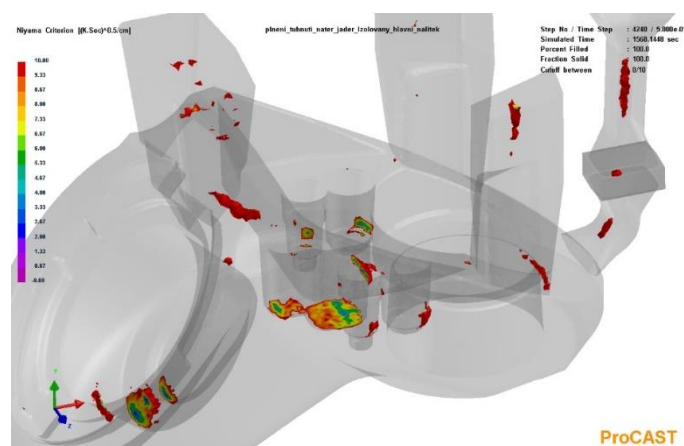
Obr. 80 Průběh tuhnutí – varianta 2C (bez bočních nálitků)



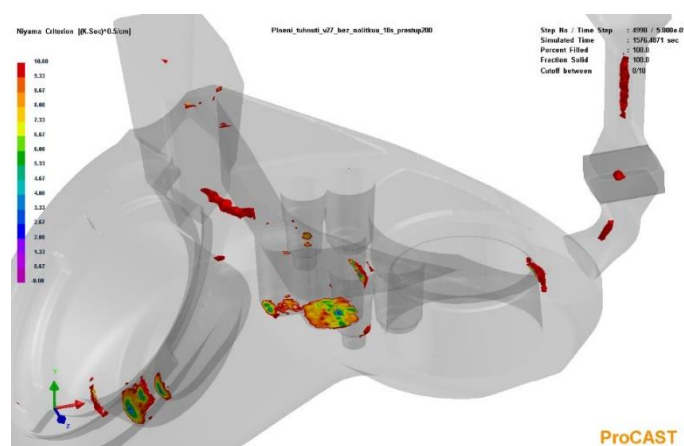
Obr. 81 Predikce porezity – varianta 2C (bez bočních nálitků)



Na obrázcích č. 82 a č. 83 je srovnání Niyamova kritéria pro variantu 2C a variantu úvodní, kde v těchto místech byla hodnota Niyamova kritéria blízko kritickému rozsahu 0 až 3  $[\text{K} \cdot \text{s}]^{0,5} / \text{cm}$ .



Obr. 82 Niyamovo kritérium – úvodní varianta (stupnice 0 až 10  $[\text{K} \cdot \text{s}]^{0,5} / \text{cm}$ )



Obr. 83 Niyamovo kritérium – varianta 2C (stupnice 0 až 10  $[\text{K} \cdot \text{s}]^{0,5} / \text{cm}$ )

Závěrem kapitoly 5.3 je konstatování, že se neprokázala správná funkce bočních nálitků. Menší sklon k tvorbě vady v oblasti 2 byl prokázán u varianty 2C, kde byly boční nálitky zaslepeny. Tato změna technologie nálitkování mimo minimalizování sklonu k tvorbě vad na obvodu středovým jádrem předlitých otvorů vede ke zvýšení využití tekutého kovu. Místo 36 kg je na odlití jednoho surového kusu, potřeba pouze 32,5 kg. Na jednom vyrobeném kusu se tedy ušetří 3,5 kg tekutého kovu a sklon k tvorbě vady na obvodu otvorů pro závit se sníží oproti lití při stejných podmínkách do kokily s bočními nálitky.

## 5.4 Simulace kombinace příčin

Ve variantách 1A až 1D byla na základě výsledků numerických simulací rozebrána příčina vady vyskytující se pod neprůchozími předlévanými otvory. Ve variantách 2A až 2C byla objasněna naopak vada vyskytující se na obvodu těchto předlitých otvorů. Předmětem této podkapitoly jsou varianty numerické simulace označené 3A a 3B. Cílem těchto variant je simulovat oba dříve definované negativní vlivy dohromady.

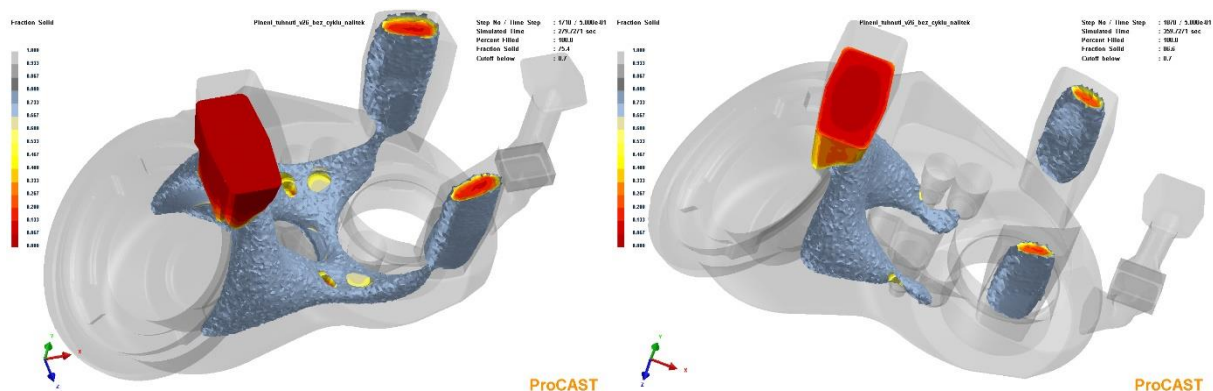
### 5.4.1 Vliv chladného jádra v kombinaci s izolovanými bočními nálitky (Varianta 3A)

V tabulce č. 17 jsou definovány vstupující parametry. Varianta 1C, ze které byly převzaty konstantní počáteční teploty, dokazovala negativní vliv chladného středového jádra. Pro zahrnutí nevhodné funkce bočních nálitků, jako příčiny vady v oblasti 2, byly aplikovány poznatky z varianty 2B.

Tab. 17 Vstupní parametry varianty 3A

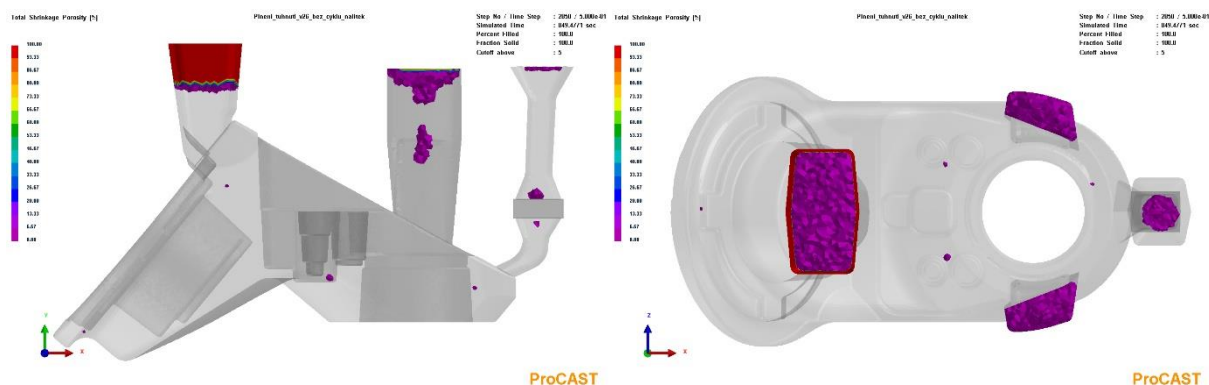
Parametry vycházející z varianty 1C	
Středové jádro	200°C
Kokila, spodní a šikmé jádro	350°C
Parametry vycházející z varianty 2B	
Zvýšení izolační schopnosti bočních nálitků	$h = 200 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

Kritické okamžiky tuhnutí jsou zachyceny na obrázku č. 84. Pásma tekuté fáze pod středovým jádrem je značně zúžená z důvodu jeho nízké teploty, jako ve variantách 1A, 1C a 1D. To je opět příčinou oddělení tekuté fáze v kritickém místě. Charakter tuhnutí kovu v bočních nálitkách je srovnatelný s variantou 2B. Ukazuje se ovšem, že vliv nízké teploty středového jádra převažuje, a nedojde k oddělení tekutého kovu na obvodu.



Obr. 84 Průběh tuhnutí – varianta 3A

Predikce porezity odpovídá charakteru tuhnutí (viz obrázek č. 84). Tato varianta ukazuje, že ochlazení středového jádra by zdánlivě mohlo vypadat jako řešení problémů s vadami typu dutin v okolí předlétaných neprůchozích otvorů. Jeho nízká teplota minimalizuje sklon k vytvoření vady na obvodu otvoru. Jelikož se běžně neprovádí defektoskopické zkoušky a vada vytvořená v oblasti 1 se tak při vizuální kontrole nemusí odhalit (viz provedená analýza, kdy byla vada zdokumentována cca 1 cm pod otvory). Pravděpodobně se ale v odlitku při podmínkách podle tabulky č. 17 nachází. Z provedených variant je jednoznačné, že při nižších teplotách středového jádra je tuhnutí v této oblasti velmi kritické na oddělení tekuté fáze.



Obr. 85 Predikce porezity – varianta 3A

#### 5.4.2 Vliv chlazeného jádra bez bočních nálitků (Varianta 3B)

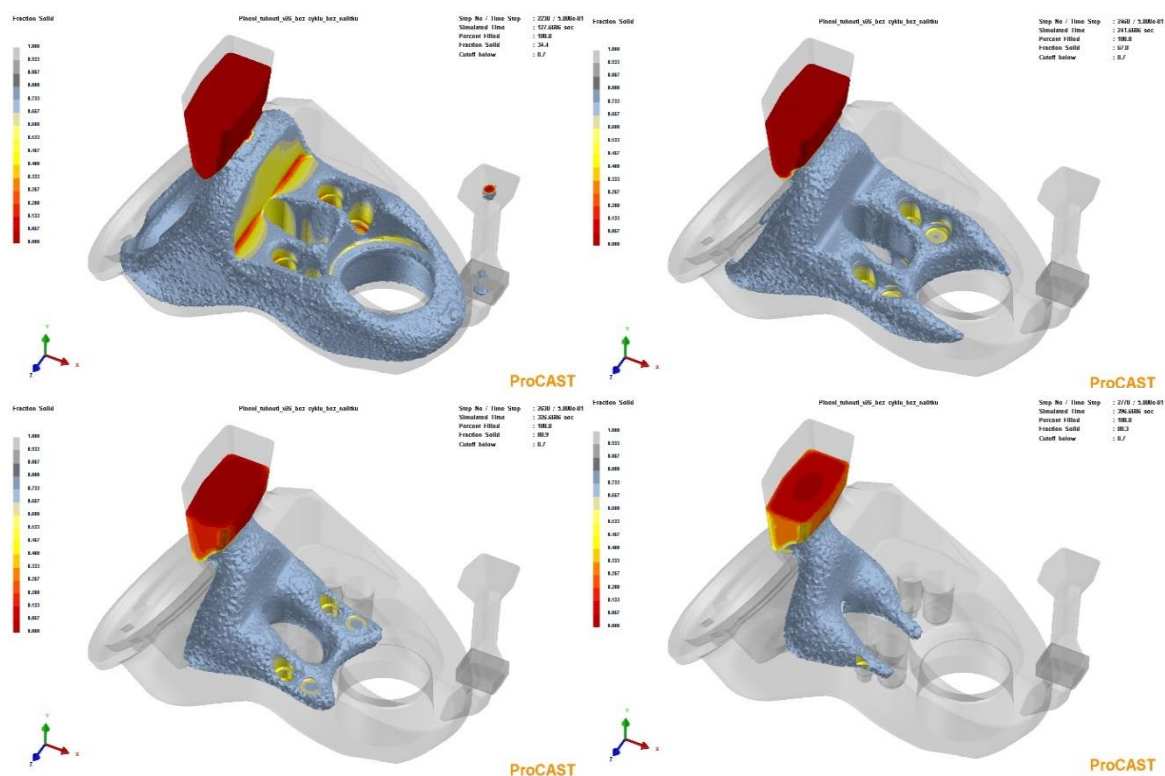
V kapitole 5.2 bylo dokázáno, že není vhodné chladit středové jádro, jelikož poté může být příčinou vady pod předlitými otvory. V kapitole 5.3, se prokázalo, že k minimalizování sklonu k výskytu vady na obvodu předlitých otvorů, je vhodné z technologie zcela odstranit boční nálitky. Varianta 3A prokázala, že chladné jádro je příčinou vady v oblasti 1 i v případě, kdy je tento negativní vliv spojen s vlivem nevhodně fungujících nálitků. Následující varianta 3B ukazuje, zda odlévání bez bočních nálitků působí příznivě také ve spojení s vadami způsobené nízkými teplotami středového jádra. Vstupní podmínky varianty 3B jsou definovány v tabulce č. 18 a jsou shodné s předchozí variantou (viz tabulka č. 17). Boční nálitky byly opět zaslepeny materiálem shodným s materiálem kokily a jader.

Tab. 18 Vstupní parametry varianty 3B

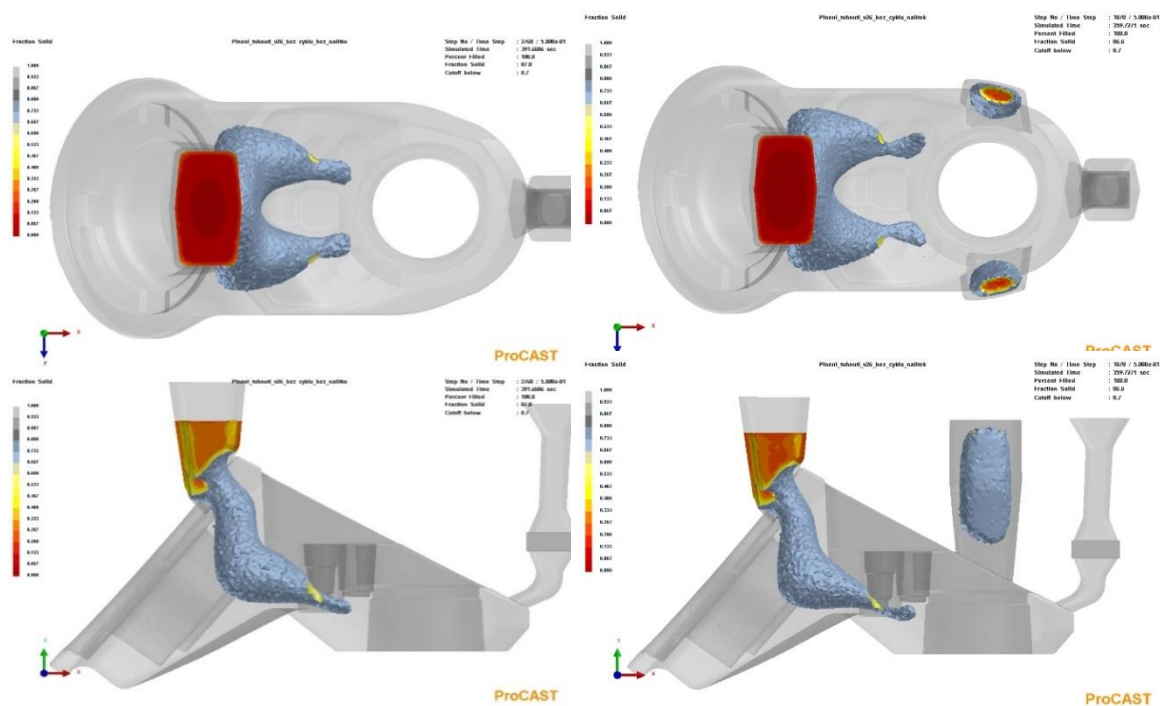
Středové jádro	200°C
Kokila, spodní a šikmé jádro	350°C
Boční nálitky	Zaslepený (Ocel H11)

Na obrázku č. 86 je zřetelné, že tuhnutí bez bočních nálitků má vhodnější průběh, než ve variantě 3A (viz obrázek č. 84). Nevytváří se protažení postupující fronty tuhnutí směrem k bočním nálitkům. Tato skutečnost určuje menší sklon k vytvoření vady v oblasti 2. Rozdíl charakteru průchodu fronty tuhnutí kolem kritického místa pod předlitými otvory není tak zřetelný. Z toho důvodu je uvedeno porovnání na obrázku č. 87. Vlevo je varianta bez

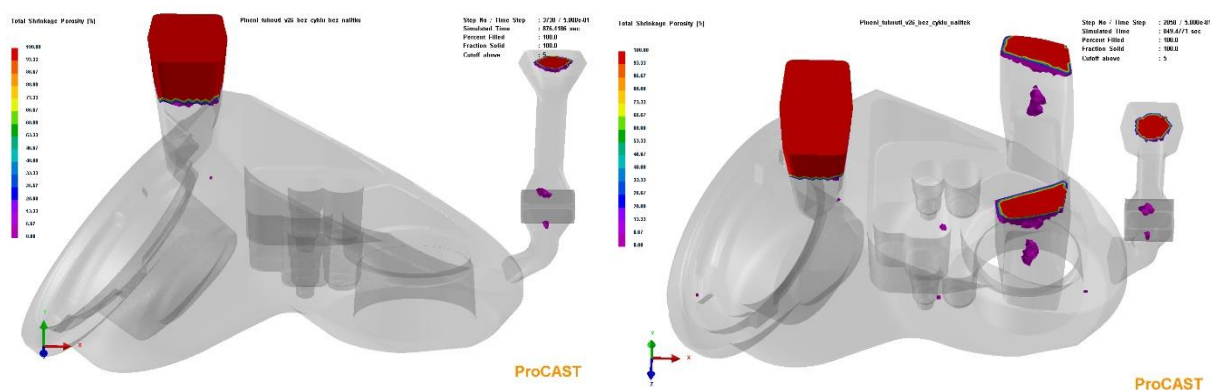
bočních nálitků a vpravo původní varianta s nimi. Ostatní vstupní parametry jsou shodné. Zde je již možné vidět, že zaslepení nálitků na modelu má příznivý vliv i v případě nevhodného tuhnutí způsobeného nízkou teplotou středového jádra.



Obr. 86 Průběh tuhnutí – varianta 3B



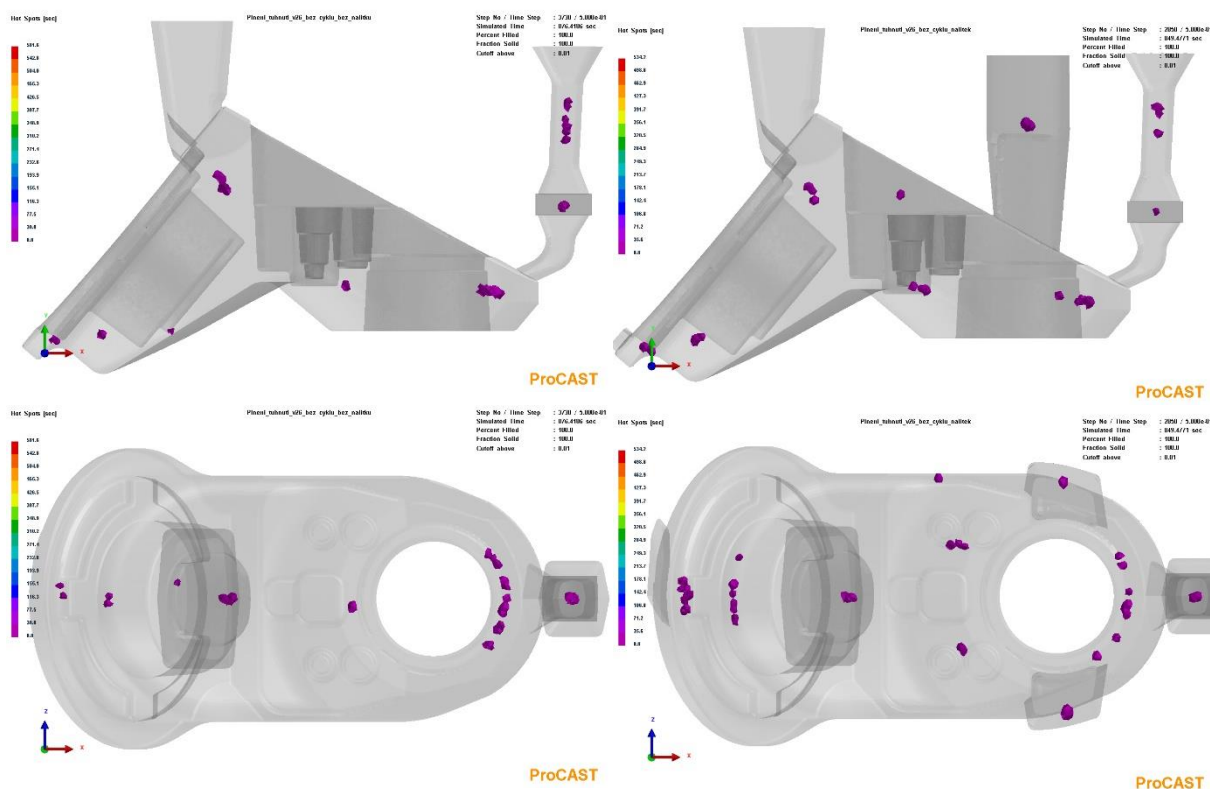
Obr. 87 Porovnání průběhu tuhnutí – varianta 3B vlevo, varianta 3A vpravo



Obr. 88 Porovnání predikce porezity – varianta 3B vlevo, varianta 3A vpravo

Na obrázku č. 88 je provedeno srovnání predikcí vad v těchto dvou variant na základě základní funkce pro predikci porezity v ProCASTu. Dále je provedeno srovnání predikcí horkých míst (viz obrázek č. 89). Obě tyto kritéria potvrzují správnost dřívějších tvrzení.

Lze tedy konstatovat, že odebrání bočních náliček z technologie, je vhodným krokem. Docílí se zvýšení využití tekutého kovu o 10%. Navíc se významně sníží sklon k tvorbě vad v obou zkoumaných oblastech. Sníží se negativní vliv možných kolísajících teplot středového jádra.



Obr. 89 Porovnání predikce „Hot Spots“ – varianta 3B vlevo, varianta 3A vpravo



## 5.5 Doporučená podoba technologické karty

V úvodu praktické části byl zmíněn problém s nedostatečně zavedenými parametry výrobního procesu do technologické karty. Byl tedy vypracován doporučující návrh, jak by mohla vypadat technologická karta, která zahrnuje všechny důležité údaje vstupující do výrobního procesu gravitačního kokilového lití.

PARAMETRY VÝROBY ODLITKU – KOKILOVÉ GRAVITAČNÍ LITÍ			
Označení odlitku	NR 5635		
Materiál	AlSi12		
Váha surového odlitku	36 kg		
Teplota lití	720°C		
Materiál kokily a jader			
Filtr	Typ:	Pórovitost:	ppi
Nátěry nálitků	Typ:	Tloušťka:	mm
Nátěry jader	Typ:	Tloušťka:	mm
Chlazení kokily			
Chlazení jader			
Teplota předehřevu kokily			°C
Teplota předehřevu jader			°C
Doba lití			s
VÝROBNÍ PROCES			
CELKOVÁ DOBA CYKLU			s
Proces	Start	Konec	
Plnění kokily (začátek cyklu)			s
Otevření kokily			s
Vyhození odlitku			s
Ostřík			s
Ofuk			s
Uzavření kokily a čekání na další cyklus			s
Četnost obnovy nátěrů v průběhu výroby			
Průběžná kontrola teploty kokily před uzavřením (v 5. cyklu)			°C
Průběžná kontrola teploty jader před uzavřením (v 5. cyklu)			°C
Pozn.: Z důvodu souvislosti výskytu vad s různými teplotami kokily a jader se doporučuje u následující objednané série zjistit, které z odlitků ve výrobním cyklu jsou neshodné.			

## Závěr

Cílem této diplomové práce bylo s využitím numerických simulací provést analýzu stávající technologie výroby hliníkového odlitku hlavy do CNC frézky. V úvodní části byla stručně shrnuta současná situace v oblasti numerických simulací. Dále byly popsány charakteristiky technologie gravitačního kokilového lité se zaměřením na tepelné děje.

Praktická část se nejdříve zabývá popisem technologie řešeného odlitku s ohledem na vyskytující se slévárenské vady. Následně byla provedena analýza vady, se kterou má slévárna dlouhodobé problémy. Tato vada byla určena jako staženina, v některých případech kombinovaná s plynem. Následovalo vypracování první verze numerické simulace v programu ProCast. Z důvodu nedostatečných informací v technologické kartě odlitku, musely být některé zásadní parametry zvoleny. Byla provedena kompletní analýza simulovaných výsledků plnění a tuhnutí. Vady se neprokázaly, ale určily se směry dalšího postupu. Simulace byla následně upravena, aby lépe odpovídala reálnému stavu, kdy se provádí dolévání do středového nálitku nad tepelným uzlem. S doladěnou simulací se postupně testovali různé vlivy, u kterých se předpokládalo, že by mohli být příčinou vytvoření vady.

Kapitola 5.2 byla zaměřena na simulaci příčin vad v oblasti pod předlévanými neprůchozími otvory (oblast 1). Několika simulovanými variantami se prokazatelně dospělo k závěru, že vada v této oblasti je spojena se sníženými teplotami středového jádra. To může nastat na začátku výrobního cyklu, kdy systém kokily není dostatečně prohřátý. Dále tento stav může nastat při provádění chlazení středového jádra vodou. Toto chlazení nebylo přesně specifikováno, ale z průběhu tuhnutí lze vyvodit závěr, že nízké teploty středového jádra oproti zbytku kokilového systému, zvyšují sklon k oddělení tekuté fáze při tuhnutí v kritické oblasti pod výstupky středového jádra.

V kapitole 5.3 byla testována funkčnost bočních nálitků. Byl simulován stav, kdy by boční nálitky byly více izolované, a tedy zůstaly déle v tekutém stavu. Na základě této varianty se zjistilo, že dříve tuhnoucí nálitky, paradoxně ve výsledku vedou k menšímu sklonu k vytvoření vady v oblasti 2. Tento případ ukázal možnou souvislost příčiny vady na obvodu otvorů pro závit s funkcí bočních nálitků. U následující varianty simulace, kdy se za nezměněných ostatních podmínek tyto nálitky zaslepily, se neprokázaly vady ani v jedné ze zkoumaných oblastí.

Kapitola 5.4 zohlednila oba negativní vlivy, tedy středové jádro o nízkých teplotách a více izolované boční nálitky. Výsledkem této varianty byla predikce vad v oblasti 1. Z této skutečnosti plyne závěr, že chlazené středové jádro se může zdánlivě jevit jako nápravné opatření proti vzniku vady po obvodu závitů. V důsledku zúžení pásma tuhnutí v oblasti pod středovým jádrem, totiž nedojde k oddělení tekuté fáze a následné predikci vady na obvodu otvorů pro závit, ale pod nimi. Z provedené analýzy v kapitole 3.2.2 plyne, že tyto vady nemusí zasahovat do přídavku na obrábění a odhalí se pouze defektoskopickou zkouškou, která se běžně neprovádí.

Dále je v kapitole 5.4 provedena varianta, kdy se oba tyto negativní vlivy simulují s jinak nezměněnými podmínkami na modelu se zaslepenými bočními nálitky. Průběh tuhnutí je vhodnější, a i když z důvodu snížené teploty středového jádra je průchod tuhnutí kolem výstupků jádra kritičtější, vady zde nejsou predikovány.

Na základě vypočtených výsledků v kapitole 5.2 a 5.4 se slévárně nedoporučuje dále provádět chlazení středového jádra vodou stávajícím způsobem. Toto chlazení se nezdá být reprodukovatelné a není známo, na jaké teploty v důsledku tohoto chlazení jádro klesá. Z výsledků vyplývá, že jádro ochlazené na určité teploty (ověřeno pro 200°C při teplotě zbytku kokily 350°C), může mít souvislost s vyskytujícími se vadami v oblasti pod předlévanými otvory. Doporučuje se proto v reálných podmínkách zmapovat teploty jednotlivých částí kokily a jader v průběhu výrobního cyklu. Poté navrhnout případný chladicí cyklus tak, aby byl technicky proveditelný, reprodukovatelný a kokila pracovala v ustáleném teplotním cyklu.

Ze závěrů v kapitolách 5.3 a 5.4 se doporučuje v reálných podmínkách ověřit vypočtené varianty se zaslepenými nálitky, kdy se v každém simulovaném případě toto opatření ukázalo jako vhodné. Při prokázání těchto výsledků numerických simulací by se surová hmotnost odlitku snížila z 36 kg na 32,5 kg. Využití tekutého kovu by se tak zvýšilo o necelých 10 % při snížení sklonu ke vzniku analyzovaných vad.

Na počátku nastal problém s definováním parametrů vstupujících do numerické simulace. V technologické kartě byl specifikován pouze materiál, teplota lití a surová hmotnost odlitku. Přistoupilo se tedy k virtuálnímu experimentu analýzy příčin vad. Následujícím krokem by bylo na základě vypočtených příčin a navržených řešení provést ověření v reálných podmínkách. To již nebylo z důvodu kampaňovitého lití řešeného odlitku možné zařadit do této diplomové práce. Dále se slévárně doporučuje rozšířit technologickou kartu o další parametry výroby a průběžně je sledovat. Bylo prokázáno, že změny některých podmínek mohou mít významný vliv na charakter tuhnutí a s ním spojený vznik staženin. Příklad rozšíření technologické karty je uveden v kapitole 5.5.

## Seznam použitých zdrojů a literatury

1. *World Technical Forum: Brno, Czech Republic : 1st-3rd June 2009 : book of abstracts*. Brno: TA-Service, 2009. ISBN 978-80-904020-2-7.
2. *ESI's Casting Simulation Suite: ProCAST* [online]. Šamorín: Ten Slovakia, 2017 [cit. 2019-03-10]. Dostupné z: <http://www.b52thed00r.eu/procast/?lang=en>
3. KRUTIŠ, Vladimír. Simulace – součást virtuální továrny. *Slévárenství*. Brno: Svaz sléváren České republiky, 2014, LXII(3 – 4), 68-70.
4. BONOLLO, Franco a Stefano ODORIZZI. *Numerical Simulation of Foundry Processes*. Padova: Servizi Grafici Editoriali, 2001. ISBN 88-86281-63-3.
5. FLAU, Jens a Damian MCGUCKIN. The Practical and Effective Deployment of Virtual Casting. In: *ESI Group* [online]. 21.2.2018 [cit. 2019-02-27]. Dostupné z: <https://www.esi-group.com/cz/resources/technical-paper/practical-and-effective-deployment-virtual-casting#form>
6. JAROSLAV, Beňo a Nikol ŠPIRUTOVÁ. *Počítačová podpora lití a tuhnutí odlitků* [online]. Ostrava, 2013 [cit. 2019-03-17]. Dostupné z: [https://www.fmfi.vsb.cz/export/sites/fmfi/modin/cs/studijni-opory/resitelsky-tym-2-metalurgie/pocitacova-podpora-liti-a-tuhnuti-odlitku/Beno\\_Pocitacova-podpora-liti-a-tuhnuti-odlitku.pdf](https://www.fmfi.vsb.cz/export/sites/fmfi/modin/cs/studijni-opory/resitelsky-tym-2-metalurgie/pocitacova-podpora-liti-a-tuhnuti-odlitku/Beno_Pocitacova-podpora-liti-a-tuhnuti-odlitku.pdf). Studijní opory. VŠB–Technická univerzita Ostrava
7. NOVÁ, Iva. *Tepelné procesy ve slévárenských formách*. Liberec: Technická univerzita, 2002. ISBN 80-7083-662-8.
8. *PROCAST – Nástroj pro simulaci slévárenských procesů* [online]. Brno: ESI, 2015 [cit. 2019-04-13]. Dostupné z: [https://www.esi-group.com/sites/default/files/resource/brochure\\_flyer/1530/casting\\_brochure\\_04-2015\\_01\\_print\\_cz\\_2.pdf](https://www.esi-group.com/sites/default/files/resource/brochure_flyer/1530/casting_brochure_04-2015_01_print_cz_2.pdf)
9. HERMAN, Aleš. FOND-EX a MSV 2012 – Novinky v oblasti numerické simulace slévárenských procesů. *Slévárenství*. Brno: Svaz sléváren České republiky, 2012, LX(11–12), 422-423.
10. BUTTLER. Die casting (Permanent Mold). *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*. 1. 2016, s. 2147-2152. ISBN 978-0-08-043152-9.
11. MICHNA, Štefan. *Encyklopedie hliníku*. 1. Prešov: Adin, 2005. ISBN 80-89041-88-4.
12. ROUČKA, Jaromír. *Metalurgie neželezných slitin*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2790-6.
13. KRUTIŠ, Vladimír. *Numerická simulace slévárenských procesů – Přestupy tepla: Podklady k předmětu PMM*. Brno, 2005.
14. CAMPBELL, John. *Castings*. 2nd ed. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2003. ISBN 0750647906.
15. *FLOW-3D Cast* [online]. Rybitví: VHRoušar, 2015 [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: <http://www.vhrousar.cz/flow-3d-cast>

16. *European Steel and Alloy Grades/Numbers* [online]. Kharkov: National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute ", 2019 [cit. 2019-02-28]. Dostupné z: [http://www.steelnumber.com/en/standard\\_alloy\\_all\\_grades\\_eu.php?type\\_id=2](http://www.steelnumber.com/en/standard_alloy_all_grades_eu.php?type_id=2)
17. *Rentgenové snímky odlitků poskytnuté firmou Slévárna a modelárna Nové Ransko s.r.o.* Nové Ransko, 2019.
18. ELBEL, Tomáš. *Diagnostika a řízení kvality odlitků* [online]. 1. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2013 [cit. 2019-05-09]. ISBN 978-80-248-3356-9. Dostupné z: [http://katedry.fmmi.vsb.cz/Modin\\_Animace/Opory/02\\_Metalurgicke\\_inzenyrstvi/08\\_Diagnostika\\_a\\_rizeni\\_kvality\\_odlitku/Elbel\\_Diagnostika\\_a\\_rizeni\\_kvality.pdf](http://katedry.fmmi.vsb.cz/Modin_Animace/Opory/02_Metalurgicke_inzenyrstvi/08_Diagnostika_a_rizeni_kvality_odlitku/Elbel_Diagnostika_a_rizeni_kvality.pdf)
19. KANTORÍK, Radoslav. Reoxidácia a jej štúdium pomocou simulácie prúdenia kovu v zlievarenskej forme. *Slévárenství*. Brno: Svaz sléváren České republiky, 2010, LVIII(1-2), 34 –37.
20. BRŮNA, Marek. Reoxidation Processes Prediction in Gating System by Numerical Simulation for Aluminium Alloys. *Archives of Foundry Engineering*. 2017, **17**(3), 23 – 26. DOI: 10.1515. ISSN 2299-2944.
21. *SOLIDCast UNIT 25: Output Criteria: The Niyama Criterion* [online]. Finite Solutions, 2016 [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: [https://finite.solutions/documentation/sc\\_unit25/](https://finite.solutions/documentation/sc_unit25/)



## Seznam obrázků

Obr. 1 Numerická simulace tuhnutí hliníkového odlitku [2] .....	10
Obr. 2 Optimalizace technologie ocelového prstence – predikce porezity [5] .....	11
Obr. 3 Síť vygenerovaná metodou FDM [6] .....	13
Obr. 4 Síť vygenerovaná metodou FEM [6] .....	13
Obr. 5 Srovnání produktivity výroby technologií pro odlévání Al slitin [10] .....	17
Obr. 6 Obsah uzavřeného vzduchu v odlitcích z Al slitin v závislosti na technologii [4] .....	18
Obr. 7 Rozložení teplotního pole ve válcovém odlitku [13] .....	19
Obr. 8 Teplotní profil v soustavě odlitek-kokila [14] .....	22
Obr. 9 Rozložení teplotního pole ve formě [15] .....	24
Obr. 10 Fotografie řešeného odlitku 1 .....	26
Obr. 11 Fotografie řešeného odlitku 2 .....	26
Obr. 12 Slévárenská vada v místě obráběného závitu.....	28
Obr. 13 Fotografie kokily.....	29
Obr. 14 Chlazené středové jádro .....	30
Obr. 15 Místa výskytu slévárenských vad (oblast 1 – dutina pod předlévaným otvorem detekovaná rentgenovou zkouškou, oblast 2 – dutina v přídávku na obrábění závitu).....	31
Obr. 16 Rentgenové snímky odlitku 1 (označení: 01 – vlevo, 02 – vpravo) [17].....	32
Obr. 17 Rentgenové snímky odlitku 2 (označení: 03 – vlevo, 04 – vpravo) [17].....	32
Obr. 18 Rozřezaný odlitek .....	33
Obr. 19 Řez odlitkem 1 (vlevo místo 01, vpravo místo 02).....	33
Obr. 20 Řez odlitkem 2 (vlevo místo 03, vpravo místo 04).....	34
Obr. 21 Staženina v místě označeném 02 .....	35
Obr. 22 Staženiny místě označeném 04 .....	35
Obr. 23 Kombinace staženiny a plynové vady v místě označeném 01 .....	36
Obr. 24 Model kokily s jádry .....	37
Obr. 25 Model odlitku s technologií .....	38
Obr. 26 Model otevřené kokily .....	38
Obr. 27 Vygenerovaná FEM síť pro numerickou simulaci.....	39
Obr. 28 Cyklování podle dodaných parametrů (viz tabulka č. 3) .....	42
Obr. 29 Rozložení teplotního pole ve výrobním cyklu (stupnice 200 – 530°C).....	43
Obr. 30 Výsledné rozložení teplot po pátém cyklu (stupnice 200 – 530°C).....	43
Obr. 31 Zvolené body pro vykreslení křivek průběhu teplot .....	44
Obr. 32 Křivky teplot během výrobního cyklu v daných bodech .....	44
Obr. 33 Rozložení teplot při plnění (stupnice – „Current State“) .....	45
Obr. 34 Rozložení teplot po naplnění (stupnice – 600°C až 720°C) .....	46
Obr. 35 Teplota kovu v okamžiku zaplnění daného objemu (stupnice 600°C až 720°C).....	47
Obr. 36 Zobrazení rychlostí při plnění kokily (stupnice 0 m/s až 1,5 m/s).....	47
Obr. 37 Zobrazení rychlosti proudění kovu v řezu vtokovou soustavou (stupnice – 0 m/s až 1,5 m/s).....	48
Obr. 38 Vektory rychlosti proudění v řezu vtokové soustavy.....	48
Obr. 39 Víření v oblasti zaústění vtokové soustavy .....	49
Obr. 40 Doba zaplnění jednotlivých částí (stupnice 0 až 18 sekund) .....	49

Obr. 41 Vzduch ve vtokové soustavě .....	50
Obr. 42 Zobrazení vzduchu v průběhu plnění .....	50
Obr. 43 Hodnoty funkce „Oxides“ na počátku plnění (stupnice 0 až $0,2 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}$ ) .....	51
Obr. 44 Hodnoty funkce „Oxides“ při rozvlnění hladiny (stupnice 0 až $1,3 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}$ ) .....	52
Obr. 45 Rozložení tlaku: tekutého kovu v zcela zaplněné kokile (stupnice 1 až 1,11 bar) – vlevo, tekutého kovu dopadajícího na jádro (stupnice 1 až 1,03 bar) – vpravo .....	52
Obr. 46 Sklon k nezaběhnutí .....	53
Obr. 47 Sklon k erozi jádra .....	53
Obr. 48 Doba tuhnutí .....	54
Obr. 49 Tepelný uzel (doba tuhnutí zobrazená v řezu) .....	54
Obr. 50 Průběh tuhnutí .....	55
Obr. 51 Predikce porezity .....	55
Obr. 52 Niyamovo kritérium (stupnice 0 až $10 [\text{K} \cdot \text{s}]^{0,5} / \text{cm}$ ) .....	56
Obr. 53 Predikce funkcí „Hot Spots“ (horká místa po ztuhnutí) .....	57
Obr. 54 Tepelný modul podle Chvorinova vztahu (stupnice 1 až 7,4 cm) .....	57
Obr. 55 Způsob dělení podnáltkové části .....	58
Obr. 56 Rozřezaná podnáltkové část odlitku .....	58
Obr. 57 Řediny v podnáltkové oblasti .....	59
Obr. 58 Tuhnutí s doléváním do nálitku .....	59
Obr. 59 Porezita s doléváním do nálitku .....	60
Obr. 60 Tepelný modul podle Chvorinova vztahu (stupnice 1 až 8,5 cm) .....	60
Obr. 61 Oblast výskytu staženin 1 .....	61
Obr. 62 Tuhnutí a predikce porezity – varianta 1A .....	62
Obr. 63 Tuhnutí – varianta 1B .....	63
Obr. 64 Predikce porezity – varianta 1B .....	63
Obr. 65 Průběh tuhnutí – varianta 1C .....	64
Obr. 66 Oddělení tekuté fáze – varianta 1C .....	65
Obr. 67 Predikce porezity – varianta 1C .....	65
Obr. 68 Predikce oddělených horkých míst .....	66
Obr. 69 Fotografie vady potvrzující výsledky numerické simulace .....	66
Obr. 70 Průběh tuhnutí – varianta 1D (cyklus) .....	67
Obr. 71 Průběh tuhnutí v řezu – varianta 1D .....	68
Obr. 72 Výsledné rozložení teplot po pátém cyklu (stupnice 200 – 480°C) .....	68
Obr. 73 Oblast výskytu vady 2 .....	69
Obr. 74 Průběh tuhnutí – varianta 2A .....	70
Obr. 75 Predikce porezity – varianta 2A .....	70
Obr. 76 Průběh tuhnutí – varianta 2B .....	71
Obr. 77 Predikce porezity – varianta 2B .....	72
Obr. 78 Srovnání varianty 2B – vlevo a úvodní varianty – vpravo (stejný čas od počátku tuhnutí) .....	72
Obr. 79 Srovnání charakteru tuhnutí bočního nálitku varianty 2B – vlevo a úvodní varianty – vpravo .....	73
Obr. 80 Průběh tuhnutí – varianta 2C (bez bočních nálitků) .....	74
Obr. 81 Predikce porezity – varianta 2C (bez bočních nálitků) .....	74

Obr. 82 Niyamovo kritérium – úvodní varianta (stupnice 0 až 10 $[K \cdot s]^{0.5} / cm$ ) .....	75
Obr. 83 Niyamovo kritérium – varianta 2C (stupnice 0 až 10 $[K \cdot s]^{0.5} / cm$ ) .....	75
Obr. 84 Průběh tuhnutí – varianta 3A .....	76
Obr. 85 Predikce porezity – varianta 3A .....	77
Obr. 86 Průběh tuhnutí – varianta 3B .....	78
Obr. 87 Porovnání průběhu tuhnutí – varianta 3B vlevo, varianta 3A vpravo .....	78
Obr. 88 Porovnání predikce porezity – varianta 3B vlevo, varianta 3A vpravo .....	79
Obr. 89 Porovnání predikce „Hot Spots“ – varianta 3B vlevo, varianta 3A vpravo.....	79

## Seznam tabulek

Tab. 1 Chemické složení slitiny AlSi12 v procentech [16].....	27
Tab. 2 Mechanické vlastnosti slitiny AlSi12 v litém stavu [16] .....	27
Tab. 3 Technologické údaje poskytnuté slévárnou .....	40
Tab. 4 Zvolené vstupní parametry do numerické simulace .....	41
Tab. 5 Variace vstupních parametrů pro simulování vlivu prvního cyklu.....	61
Tab. 6 Vstupní parametry – varianta 1A .....	61
Tab. 7 Variace vstupních parametrů pro simulování vlivu přehřátí pod středovým jádrem....	62
Tab. 8 Vstupní parametry – varianta 1B .....	62
Tab. 9 Variace vstupních parametrů pro simulování vlivu nízké teploty středového jádra.....	64
Tab. 10 Vstupní parametry – varianta 1C .....	64
Tab. 11 Vstupní parametry – varianta 1D (cyklus) .....	67
Tab. 12 Variace vstupních parametrů pro simulování vlivu intenzity přestupu tepla do jader	69
Tab. 13 Vstupní parametry – varianta 2A .....	70
Tab. 14 Vstupní parametry – varianta 2B .....	71
Tab. 15 Vstupní parametry – úvodní varianta.....	71
Tab. 16 Vstupní parametry – varianta 2C .....	73
Tab. 17 Vstupní parametry varianty 3A .....	76
Tab. 18 Vstupní parametry varianty 3B .....	77